

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Н.А. РЫНГАЧ, К.Н. БОБИН, Н.В. КУРЛАЕВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2019

УДК 629.7.02(075.8)
Р 952

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *А.В. Гуськов*
заместитель начальника цеха ЗАО «Авиакомпозит» *А.В. Эмиров*

Рынгач Н.А.

Р 952 Проектирование и изготовление авиационных конструкций из композиционных материалов: учебное пособие / Н.А. Рынгач, К.Н. Бобин, Н.В. Курлаев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 84 с.

ISBN 978-5-7782-4085-8

В учебном пособии описаны применение композиционных материалов в производстве летательных аппаратов, свойства композиционных материалов и их исходных компонентов, а также технологии изготовления изделий из композиционных материалов, их механической обработки и сборки готовых конструкций.

В пособии изложена технология производства стеклянных, углеродных, борных и органических волокон, описаны основные полимерные матрицы, а также технология формования.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей» и «Авиастроение».

УДК 629.7.02(075.8)

ISBN 978-5-7782-4085-8

© Рынгач Н.А., Бобин К.Н.,
Курлаев Н.В., 2019
© Новосибирский государственный
технический университет, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Основные сведения о композиционных материалах	6
1.1. Свойства композиционных материалов	6
1.2. Использование КМ в конструкциях ЛА	11
1.3. Армирующие материалы	15
1.3.1. Стекловолокно	16
1.3.2. Углеродные волокна.....	19
1.3.3. Борные волокна.....	21
1.3.4. Органические волокна.....	22
1.3.5. Гибридные композиты	22
1.3.6. Интеллектуальные композиционные материалы.....	23
1.4. Слоистые композиционные материалы.....	26
1.4.1. АЛОП (ARALL).....	28
1.4.2. СИАЛ (GLARE).....	29
1.5. Панели с газонаполненными и сотовыми заполнителями.....	30
1.6. Препреги.....	32
Контрольные вопросы.....	36
2. Изготовление изделий из ПКМ	37
2.1. Подготовка производства	37
2.2. Требования к технологичности изделий	42
2.3. Методы изготовления изделий.....	43
2.3.1. Вакуумный метод отверждения деталей из полимерных композиционных материалов	43
2.3.2. Вакуумно-автоклавное формование деталей из полимерных композиционных материалов.....	45
2.3.3. Прессование	47
2.3.4. Пропитка под давлением	48

2.3.5. Пултрузия	49
2.3.6. Намотка	52
2.3.7. Тетранамотка.....	56
Контрольные вопросы.....	61
3. Обработка и сборка изделий из ПКМ	62
3.1. Обработка резанием	64
3.1.1. Резка отрезными кругами	64
3.1.2. Резка ножовочными полотнами	65
3.1.3. Сверление	65
3.1.4. Токарная обработка	67
3.1.5. Фрезерование	67
3.1.6. Резка с помощью водяной струи	68
3.2. Сборка изделий из ПКМ	68
3.2.1. Механическое соединение деталей.....	70
3.2.2. Усиление композиционных деталей	75
3.3. Полимерные компенсирующие заполнители.....	76
Контрольные вопросы.....	81
Библиографический список	82

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время объем применения композиционных материалов в авиационной и космической технике, а также в других отраслях машиностроения неуклонно растет. Использование таких материалов в технике позволяет создавать легкие и прочные конструкции, обладающие высокой жесткостью. С помощью композиционных материалов можно также получать конструкции с заранее заданными свойствами, с более высоким ресурсом, чем у традиционных материалов.

Использование подобных материалов в технике требует иных, по сравнению с металлическими сплавами, подходов и решений, которые, в свою очередь, определяются особенностями изготовления изделий из композиционных материалов. В частности, в предлагаемом пособии рассматриваются вопросы, связанные с подготовкой производства изделий из композиционных материалов, особенностями проектирования, порядком выкладки слоев и последующим получением изделий.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

1.1. СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Композиционные материалы (КМ) – это материалы, состоящие из двух и более химически или физически разнородных компонентов и обладающие специфическими свойствами, отличными от суммарных свойств составляющих компонентов. Термин «композиция» идет от латинского слова «compositio», что означает составление. Компоненты КМ должны быть хорошо совместимы. Свойства КМ нельзя определять только по свойствам компонентов без учета их взаимодействия. Цель создания КМ: объединение сходных или различных компонентов для получения материала с новыми заданными свойствами и характеристиками, отличными от свойств исходных компонентов. С появлением такого рода материалов возникла возможность селективного выбора свойств композитов, необходимых для нужд каждой конкретной области применения.

Компоненты КМ подразделяются на две группы:

- наполнитель (или армирующий материал) в виде дискретных частиц или волокон, образующих дискретную фазу;
- связующие (матрица) – материал, который заполняет пространство между арматурой и образует сплошную среду.

Армирующий материал воспринимает основные напряжения, возникающие в композите под действием внешних нагрузок и определяет основные механические характеристики.

Матрица обеспечивает совместную работу дискретных элементов арматуры, объединяя их в монолит, за счет собственной жесткости и адгезии на границе матрица–арматура. Эта фаза в меньшей степени определяет механические свойства, но оказывает решающее влияние на технологические и эксплуатационные характеристики.

Монолитность и наличие границы между матрицей и наполнителем является главным признаком, отличающим КМ от смесей и растворов, т. е. гетерогенностью на микроуровне и гомогенностью на макроуровне.

Классифицируются КМ по природе матрицы и наполнителя: полимерные КМ – ПКМ, металлические КМ – МКМ, КМ с углеродной матрицей – УУКМ. ПКМ по природе армирующего материала классифицируются по типу арматуры с добавлением слова «пластик»: стеклопластик, углепластик, органопластик, боропластик и т. д. Кроме того, существуют гибридные КМ, в которых сочетается арматура из различных материалов (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Свойства армирующих волокон

Волокна	Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Температура плавления, К	Температура эксплуатации, К	
						Длительный нагрев	Кратковременный нагрев
Стекланные	2480...2550	1740...4900	49...123	1,5...5,4	973...1983	623...1073	923...1323
Органические	1140...1480	490...3530	4,5...147	2...18	673*	443...473	1073
Углеродные	1300...1950	392...3420	196...392	0,5...2	3873**	673...973	1073...1773
Борные	2340...2650	1960...3920	348...430	0,4...1	2323	523...623	1593
Стальные	7850...8100	3420...4450	196...207	0,3...2	1813	723...1073	973...1573

* В неокислительной среде.

** В вакууме.

У ПКМ матрица состоит из различных типов полимерных смол с добавками. Полимерные матрицы разделяются на две группы: термопластичные и термореактивные. В силу более высоких механических свойств и теплостойкости в основном применяются термореактивные смолы (эпоксидные, фенолформальдегидные, полиэфирные, кремнийорганические), хотя ведутся работы по использованию термопла-

стичных материалов в качестве матрицы, что дает повышение ударной прочности и трещиностойкости, а для повышения термостойкости в молекулярные цепи вводятся термостойкие элементы.

Требования, предъявляемые к матрице, разделяются на эксплуатационные и технологические. Первые обусловлены требованием работоспособности композиции в эксплуатации – обеспечивать совместную работу армирующих волокон при различных видах нагрузок. Прочностные характеристики матриц являются определяющими при оценке предельных сдвиговых нагрузок, при нагружении конструкции в направлениях, отличных от ориентации волокон, циклическом нагружении.

Природа матрицы зависит от уровня рабочих температур композита, химической стойкости к действию авиационных топлив и других агрессивных сред, водостойкости, частично электрических и теплофизических свойств. Кроме того, матрица должна обладать хорошей смачивающей способностью и адгезией к наполнителю, иметь минимальную усадку и низкий коэффициент линейного расширения (табл. 2 и 3).

Т а б л и ц а 2

Свойства матриц композиционных материалов

Характеристики	ТР-матрицы			ТП-матрицы		
	фенольно-формальдегидные	кремний-органические	эпоксидные	нейлон 6,5	полисульфон	роливсан НВ1
Предел прочности при растяжении σ , МПа	40...70	25...50	35...100	83	72	60
Модуль упругости E , ГПа	7...11	6,8...10	2,4...4,2	2,8	2,7	2,0
Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	1,2...1,3	1,35...1,4	1,2...1,3	1,14	1,26	1,32
Теплостойкость T , °С	140...180	250...280	130...150	65	174	320
Относительное удлинение, %	0,4...0,5	0,3...0,5	2...9	10	50...100	3...4
Объемная усадка, %	15...25	15...20	1...5	—	—	—

Технологические требования к матрице продиктованы одновременно спецификой процессов получения композита и изделия из него, невысокими температурой и давлением при формообразовании.

Т а б л и ц а 3

Свойства основных конструкционных материалов

Материал	Плотность ρ , кг/м^3	Прочность при растяжении σ_p , МПа	Модуль упругости при растяжении E , ГПа	Удельная прочность при растяжении, $\frac{\sigma_p}{\rho} 10^{-4}$, $\frac{\text{м}^2/\text{с}^2}{\text{м}^2/\text{с}^2}$	Удельная жесткость, $\frac{E}{\rho} 10^3$, М	Коэффициент линейного теплового расширения, (20...200 °С) 10^{-6} К^{-1}
Углепластик	1500	1200	170	80	11 300	3,5...4,5
Боропластик	2000	1200	270	60	13 550	Продольный 4,1...5,4 Поперечный 19...35
Органопластик	1300	2000	95	154	7300	3,5...4,5
Стеклопластик	2000	2000	70	100	3500	5,6...8,6
Алюминиевые сплавы	2700	600	70	22	2600	24
Титановые сплавы	4500	1100	110	24,5	2430	8,6
Стали	7800	2100	200	26,8	2580	12

По размерности армирующих элементов КМ можно разделить на нульмерные, одномерные, двумерные и трехмерные. Отдельно можно выделить слоистые (текстолиты) и хаотично наполненные КМ (рис. 1).

Дисперсно-армированный материал обычно несилевого назначения, это дешевый материал, и по отношению к нему часто используется термин «наполненная пластмасса», где наполнитель призван снизить общую стоимость изделия. Термин КМ относится чаще всего к высокопрочным материалам, заменяющим традиционные металлы и сплавы, и армированным высокопрочными ориентированными волокнами, ровингом, лентами и тканями различного плетения. Одной из характеристик нитей является линейная плотность (текс), характери-

зующаяся массой, обозначаемой в граммах на 1 км нити (или в миллиграммах на 1 м).

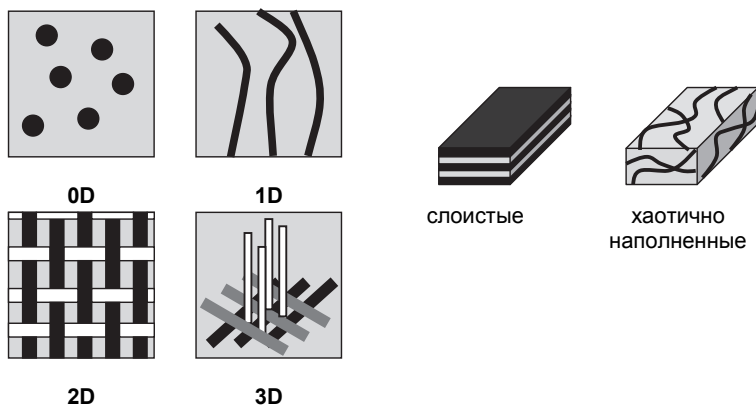


Рис. 1. Виды армирования композиционных материалов

Интерес к КМ в авиастроении вызван свойствами, которыми они обладают:

- высокие удельная прочность и жесткость, которые объясняются свойствами исходных волокон;
- возможность создавать из них элементы конструкции с заранее заданными свойствами; возможность направленно регулировать прочность, жесткость, располагая наполнитель в соответствии с тем, как распределены главные напряжения; подбирать уровень рабочих температур, регулируя макроструктуру матрицы и выбирая соответствующий материал наполнителя;
- высокая усталостная прочность, низкая скорость распространения трещин;
- возможность изготавливать детали сложной формы;
- радиопрозрачность и поглощение – ПКМ практически не отражают сигналы радарных установок;
- низкий коэффициент линейного расширения;
- высокая устойчивость к воздействию тепла, определяющаяся прежде всего высокой теплостойкостью наполнителя: стеклопластик выдерживает приблизительно 840 °С, боропластик – 2300 °С. Некоторые ПКМ способны кратковременно эксплуатироваться (несколько

секунд) при сверхвысоких температурах $\sim 2000...4000\text{ }^{\circ}\text{C}$, например, в струе горячих газов двигателя благодаря свойству, называемому аббеляцией (аббеляция – способность образовывать обугленную поверхность с низкой теплопроводностью при частичном термораспаде полимерной матрицы в поверхностном слое). При этом образуется тонкий слой газообразных веществ, также способствующих теплоизоляции.

Но ПКМ обладают и рядом недостатков, которые препятствуют их внедрению в авиастроение:

- высокая стоимость;
- сложность проектирования эффективных конструкций;
- нестабильность характеристик готовых изделий;
- сложность контроля изделия на наличие дефектов;
- сложность утилизации.

Т а б л и ц а 4

Ориентировочные цены на основные конструкционные материалы

Материал	Стоимость, долл/кг
Стекловолокно	2,5...5
Углеволокно	50...100
Арамидные волокна	20...50
Волокна на основе бора	800
Сталь	0,5
Алюминий	3
Титан	8

Стоит отметить, что высокая цена (табл. 4) на армирующие материалы несколько компенсируется более высоким коэффициентом использования материала, чем при традиционной обработке металла (до 95 %).

1.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КМ В КОНСТРУКЦИЯХ ЛА

Считается, что применение КМ в планере ЛА может сэкономить до 25...35 % массы пустого самолета, кроме того, значительно повысить жесткость и долговечность конструкций. Впервые это было продемон-

стрировано в 1955 году, когда в Японии был построен двухместный планер из стеклопластика, а в 1970 году на чемпионате мира 85 % принявших участие планеров были изготовлены из стеклопластика. Другим примером служат композитные лопасти современных вертолетов – их ресурс в среднем составляет около 1000 ч, при этом ресурс металлических лопастей первых серийных вертолетов составлял 25 ч. Кроме того, КМ часто применяются в конструкциях, в которых из-за больших размеров сложно получить одновременно жесткое и легкое изделие, например, такие как грузовые люки широкофюзеляжных самолетов.

Использование КМ в авиационно-космических конструкциях можно разделить на следующие группы:

- агрегаты, целиком изготовленные из КМ (киль, горизонтальное оперение, рули, створки шасси, кессоны крыла, каналы воздухозаборников, планер, оболочки космического транспортного корабля, лопасти винтов и т. д.);
- сэндвичевые конструкции – многослойные панели с различными наполнителями (вспененными пластмассами, сотовыми наполнителями);
- интегральные конструкции, в которых детали из ПМ выполняют функции усиливающих элементов агрегатов или отдельных деталей. Основная конструкция выполнена из металлических сплавов, а детали из ПКМ подкрепляют ее, устанавливаются на болты, заклепки или приклеиваются;
- модульные конструкции, в которых узлы из ПКМ представляют собой встроенные конструкции, выполняющие роль самостоятельных силовых элементов.

В целом сначала применение КМ в конструкциях ЛА ограничивалось обтекателями РЛС и антенн, в дальнейшем стали проектировать неотъемлемые детали типа створок шасси, щитков, заливов и обтекателей. С середины 1970-х годов стали изготавливать из КМ более ответственные части самолетов, такие как стабилизаторы, кили, закрылки, силовые панели крыла и детали внутреннего интерьера самолета. В настоящее время традиционно больше всего КМ применяются в ракетостроении, далее по убывающей – в военных вертолетах, военных самолетах, гражданских вертолетах и самолетах. Широкое применение КМ в вертолетостроении обусловлено значительно большими, чем в авиастроении, требованиями к весовой эффективности конструкции и меньшим количеством особо важных агрегатов, разрушение которых приводит к потере ЛА.

Теоретические исследования НАСА показали, насколько различными могут быть характеристики обычного и «композитного» самолета, при одинаковой полезной нагрузке и дальности полета (68 т и 8300 км соответственно) (табл. 5).

Таблица 5

Сравнение весовых характеристик самолетов

Вес	Обычный самолет	«Композитный» самолет
Взлетный, т	363	245
Пустой, т	175	96

Такое различие объясняется тем, что уменьшение веса конструкций приводит к снижению необходимой мощности двигателей и их веса, что, в свою очередь, приводит к сокращению необходимого для полета запаса топлива, что снижает общую массу самолета (рис. 2).

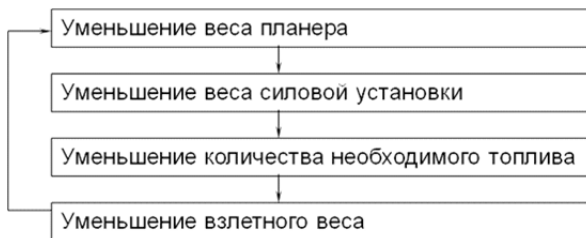


Рис. 2. Интерационное уменьшение веса планера самолета

В настоящее время использование композитов в серийно выпускаемых самолетах не превышает 20...25 %. Это можно наглядно показать на примере кия самолета А-310 (рис. 3):

- обшивка (углепластик) – 30 % общей массы;
- сотовый наполнитель, клей – 35 % общей массы;
- крепления – 25 % общей массы;
- + местные усиления и запас прочности с учетом старения.

В общей сумме это дало сокращение массы агрегата примерно на 15 % и в 20 раз уменьшило количество сборочных единиц и заклепок (рис. 4).

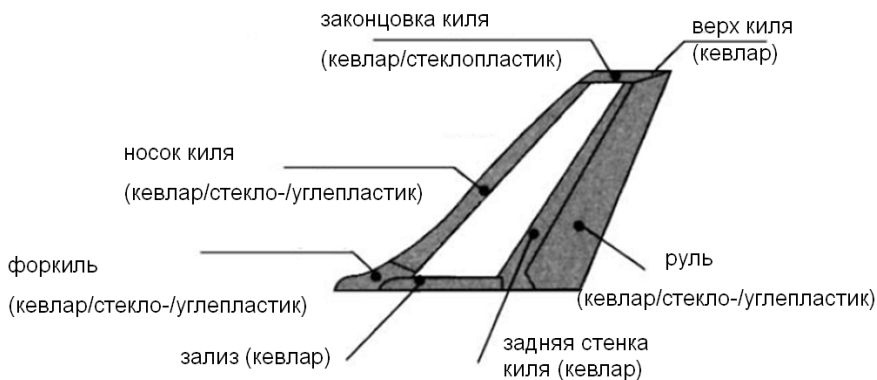


Рис. 3. Конструкция типового киля самолета семейства EADS Airbus

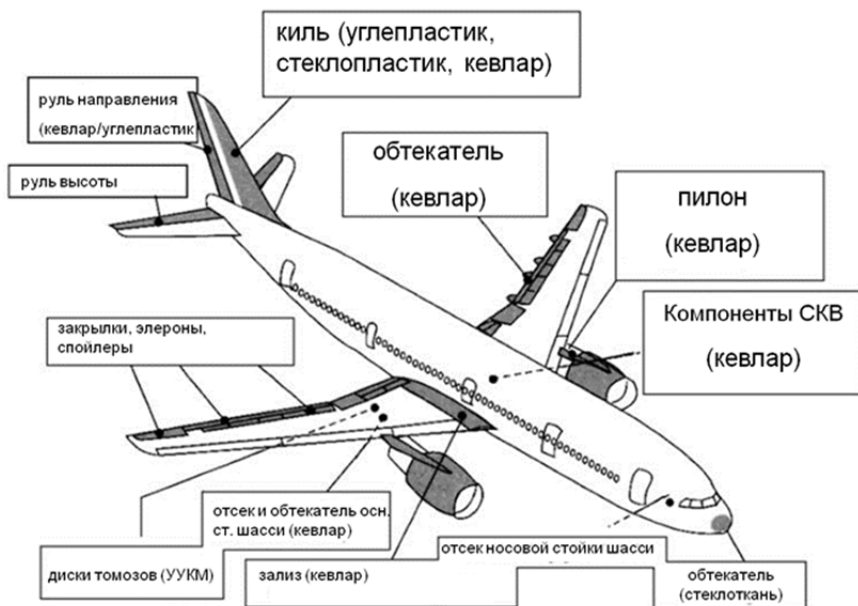


Рис. 4. Использование КМ в современном пассажирском самолете

В настоящее время использование композитов в серийно выпускаемых самолетах не превышает 25 % от общей массы планера самолета и наблюдается снижение темпов внедрения агрегатов с использованием КМ, что объясняется внедрением новых сплавов и методов их обработки. Однако с начала XXI века стала активно развиваться беспилотная авиация, в которой широко применяются КМ (RQ-4 Global Hawk), а также начались разработки малозаметных крылатых ракет (AGM-129A), что также вносит вклад в развитие КМ в конструкциях ЛА. Широкое использование КМ в этих ЛА связано с отсутствием риска для человека в случае разрушения конструкции, а также снижением радиолокационной заметности объектов (уменьшение эффективной отражающей поверхности ЛА).

Кроме того, КМ широко применяются при изготовлении спортивного инвентаря, спасательного оборудования, в судостроении, автомобилях – там, где важна высокая прочность и жесткость в сочетании с малым весом.

1.3. АРМИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Армирующий материал композитов может быть в различных видах: первичные нити, филаментные нити, ровинг, однонаправленные ленты, ткани различного плетения, многослойные нетканые материалы. Как правило, нити и ровинг используются для намотки изделий, для выкладки применяются ленты и ткани. Каждый из видов материала имеет свои достоинства и недостатки (табл. 6).

Таблица 6

Свойства различных видов армирующих материалов

Вид материала	Достоинства	Недостатки
Однонаправленная лента	Максимальная прочность и гибкость в укладке	Плохая драпируемость и возможность неровной укладки
Ткань	Хорошая драпируемость и снижение затрат на выкладку	Некоторое ухудшение свойств из-за изгиба ткани, меньшая гибкость при укладке

Вид материала	Достоинства	Недостатки
Однонаправленная ткань	Улучшенная драпируемость и ориентация в заданном направлении, минимальное снижение прочностных характеристик	Небольшое увеличение массы (плотности)
Многослойные материалы	Сокращение затрат на выкладку. Высокая стабильность свойств, необходимая для пултрузии, пропитки под давлением	Потеря гибкости при укладке, увеличивается вес и стоимость

Первичные (комплексные) нити получают непосредственно в результате вытягивания элементарных волокон из фильер и могут использоваться для армирования или для переработки в другие виды структур.

Филаментные (крученые комплексные) нити получают с помощью крутки и сложения непрерывных комплексных нитей; кроме числа сложений они характеризуются количеством круток на 1 м.

Ровинги – непрерывная пряжа, состоящая из определенного числа приблизительно параллельных первичных комплексных нитей. Подразделяются на типы (Н – для намотки и пултрузии, Т – для изготовления тканей и нетканых материалов, Р – для напыляемых изделий, П – для прошивки матов (из крученых комплексных нитей)).

Жгуты – переплетение комплексных нитей с образованием сечения, близкого к окружности.

1.3.1. СТЕКЛОВОЛОКНО

В настоящее время ПКМ, армированные стеклянным волокном, являются наиболее распространенным видом КМ, что обусловлено относительно невысокой стоимостью стеклянного волокна и его высокими механическими характеристиками. В качестве матриц для стеклопластиков могут использоваться термопласты или термореактопласты. Основу стекол составляет диоксид кремния (50...70 %) и соли металлов (алюминия, железа, кальция, магния и др.). Щелочные стеклянные

волокна дешевле и технологичнее, но по прочностным свойствам, химической стойкости, особенно при повышенных температурах, они значительно уступают безщелочным. С целью совершенствования состава оксиды щелочных металлов стараются заменить оксидами редкоземельных металлов. Менее широко используются кварцевые волокна, что связано со сложностью вытяжки таких волокон, поскольку в диапазоне температур от 300 до 1200 К модуль упругости кварцевых волокон возрастает от 74 до 83 ГПа, а при температуре 2400 К не теряет высокой вязкости. Основной способ получения волокон кварца – вытягивание из нагретых стержней (штабиков). Такие волокна используются главным образом для создания теплозащитного покрытия.

Стекловолокно не горит и не поддерживает горение, обладает высокой удельной прочностью, высокой температурой плавления и служит хорошим изолятором. Волокна из стекла обладают низким коэффициентом теплового расширения, хорошей теплопроводностью, химической стойкостью. Прочность стеклянных волокон объясняется тем, что из-за малого сечения волокна вероятность образования дефектов намного ниже, кроме того дефекты ориентируются в направлении вытяжки.

Обычно сечение стекловолокна имеет форму круга, но выпускаются также полые волокна и профилированные волокна в виде треугольника и прямоугольника, что увеличивает жесткость волокон, не изменяя их удельного веса.

Стеклянные волокна получают вытяжкой из расплава через платиновые фильеры (рис. 5) с диаметром отверстий порядка 3...25 мкм либо путем раздува нитей расплава струей воздуха – в таком случае получается штапельное волокно длиной до 380 мм.

Стеклянные волокна чувствительны к повреждениям поверхности. На прочность стеклянных волокон большое влияние оказывает также влага, адсорбированная их поверхностью, при этом снижение прочности прямо пропорционально влажности среды и времени ее воздействия. Удаление влаги путем сушки в вакууме частично восстанавливает прочность волокон (40...50 %), но полная десорбция не достигается даже при длительном вакуумировании, поэтому перед намоткой нити на барабан на нее наносят замасливатель, который защищает ее не только от влаги, но и от истирания. Существует два вида замасливателей: пассивные и активные. Первые – только защищают от влаги и удаляются перед укладкой выжиганием или травлением, затем на поверхность наносятся аппреты (вещества, улучшающие адгезию между

волоконами и матрицей); вторые – не только защищают от влаги, но и улучшают адгезию за счет введения в состав замасливателей аппретов; перед применением такое волокно только просушивают. Стоит отметить, что на выбор конкретного аппрета влияет тип матрицы изготавливаемого стеклопластика.

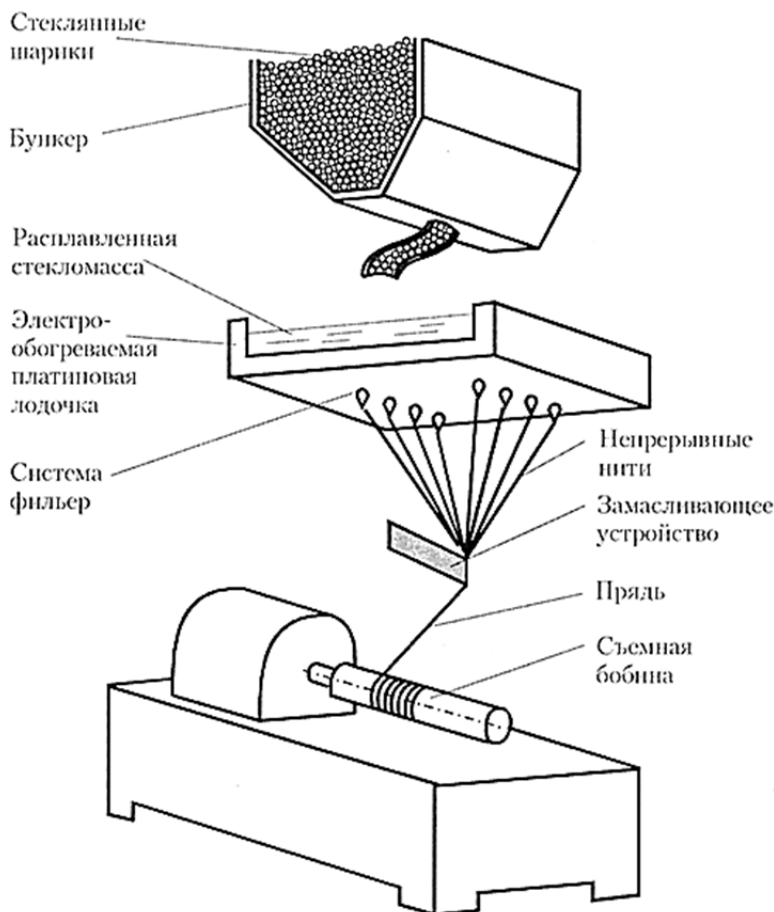


Рис. 5. Процесс получения стеклянного волокна

1.3.2. УГЛЕРОДНЫЕ ВОЛОКНА

Углеродные волокна превосходят по своим удельным показателям все жаростойкие волокна при плотности более низкой, чем у графита, что объясняется пористостью волокон. Волокна химически стойки к действию большинства химических сред, могут выдерживать длительный нагрев 230°C и кратковременно 500°C (в инертной среде свойства не меняются до температуры 1500°C). Особенностью углепластика являются также его электропроводность и анизотропия. К недостаткам углеродных волокон можно отнести хрупкость, плохую смачиваемость, высокую стоимость и небольшую номенклатуру армирующих тканей.

Механические свойства углеродных волокон находятся в достаточно широком диапазоне, поскольку определяются особенностями строения исходных волокон, технологиями конечной обработки, плотностью и характером дефектов структуры.

Для получения углеволокна (рис. 6) используют только волокнистые полимеры, которые не плавятся при термообработке и обеспечивают в конечном продукте высокое содержание углерода: полиакрилонитрильные (ПАН), гидратоцеллюлозные (вискозные ГЦ), пеки и органические волокна, полученные из фенольных смол.

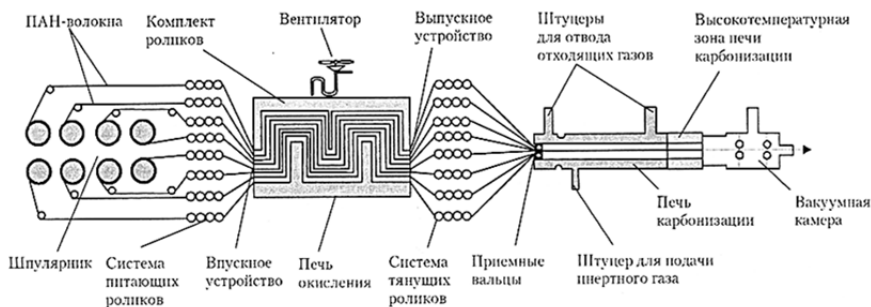


Рис. 6. Процесс получения углеродных волокон

Использование ПАН-волокон позволяет получать высокопрочные углеродные волокна при более низкой температуре нагрева материала, но при этом выделяется синильная кислота. ГЦ-волокна не выделяют синильной кислоты и дешевле ПАН-волокон, но требуют текстильной подготовки для удаления влаги, органических и неорганических

веществ. Пек – это остаток перегонки каменного угля или нефти, из него формируются волокна, которые в дальнейшем используются для получения углеродных волокон. К недостаткам пеков относится высокое содержание канцерогенных веществ. Из фенольных смол производят углеродные волокна средней прочности с низким модулем упругости, возможно также получение полых волокон различной формы.

Производство углеродных волокон основано на нагреве полимеров в инертной среде и их термической деструкции, при этом при разложении полимеров образуются летучие продукты и остается твердый коксовый остаток. Преобразование органических волокон в углеродные связано с протеканием сложных реакций, кардинальным изменением структуры при сохранении элементов первоначального полимерного скелета.

Сначала производится вытяжка и стабилизация при температуре 200...300 °С в атмосфере, при этом выгорают органические соединения, затем происходит нагрев и вытяжка в инертной атмосфере при температурах 1000...2000 °С.

В зависимости от условий обработки углеродные волокна подразделяются на карбонизированные (содержание углерода 80...99 %) и графитизированные (содержание углерода свыше 99 %) – в этом случае температура термообработки достигает 3000 °С.

Отдельно стоит выделить углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ). Они состоят из углеродной матрицы, армированной углеродным волокном. Основные достоинства УУКМ – их высокая прочность, малая плотность, высокая теплостойкость, стойкость к тепловому удару и излучению, способность поглощать большое количество тепла. УУКМ сохраняют работоспособность в окислительной среде до температур порядка 500 °С, а в инертной – до 3000 °С. Из них изготавливаются носовые обтекатели ракет, сопловые блоки, лопатки турбин, тормозные колодки самолетов.

Производство деталей из УУКМ производится по двум схемам: карбонизацией пропитанного каркаса из углеволокна и осаждением из газовой фазы углерода между волокнами каркаса детали, а также комбинацией этих методов. В первом случае в процессе карбонизации органическая матрица становится пористой, для этого цикл пропитки и карбонизации повторяют несколько раз. Во втором случае на деталь из сухого волокна осаждается углерод из газовой фазы (например, метан в комбинации с водородом или аргоном), что позволяет получить более плотный материал, но эта технология более дорогая.

1.3.3. БОРНЫЕ ВОЛОКНА

Борные волокна используют в основном в качестве армирующего материала для изготовления тяжело нагруженных элементов планера летательных аппаратов. По сравнению с другими типами армирующих материалов они обладают высокой сдвиговой жесткостью и считаются одним из наиболее эффективных упрочнителей композиционных материалов. К недостаткам боропластиков относятся: высокая стоимость, ограничения по радиусам кривизны изделия (не менее 100 мм) и сложности с механической обработкой, обусловленные хрупкостью и твердостью волокон.

Боропластики применяются в военных самолетах F-14, F-15 и F-16, в конструкциях многоразовых космических кораблей «Шаттл» использовались бороалюминиевые конструкции. Так как бор активно реагирует с металлическими матрицами, поверхность борных волокон покрывается карбидом бора или карбидом кремния («Борсик»).

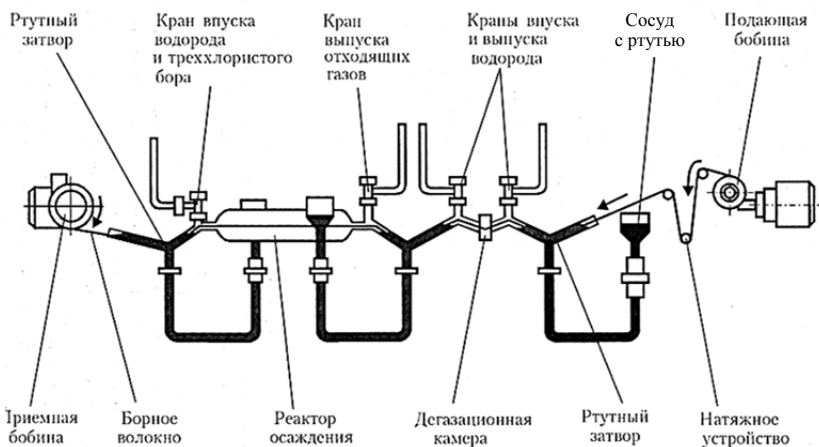


Рис. 7. Производство борного волокна

Борные волокна представляют собой моноволокна диаметром до 200 мкм, неоднородные по сечению, что объясняется методом изготовления, основанном на химическом осаждении бора из смеси газов $\text{BCl}_3 + \text{H}_2$ на вольфрамовую проволоку при температуре 1400 К (рис. 7). Вольфрамовая проволока проходит через камеру очистки, заполненной водородом, и попадает в реактор, где на нее осаждается бор. Нагрев проволоки осуществляется электрическим током, который подается

через ртутные контакты, одновременно служащие затворами. Так как электрическое сопротивление нити по мере осаждения бора неоднородно, то температурный профиль тоже неоднороден, поэтому применяют многоточечную систему подвода тока. Готовый материал наматывается на бобину. Кроме вольфрамовой проволоки для осаждения бора используется углеволокно, при этом модуль упругости получается несколько ниже. Производительность одной установки составляет около 1 кг волокна в неделю.

1.3.4. ОРГАНИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА

В качестве армирующего материала для органопластиков в основном используются органические арамидные и полиэтиленовые волокна. Основу арамидных волокон составляют ароматические (бензольные) кольца, соединенные амидными связями.

Достоинства органических волокон заключаются в высоких механических свойствах и большой пластичности, по сравнению со стеклянными и углеродными волокнами. Арамидные волокна не столь хрупки, как стеклянные и угольные, поэтому органопластики на их основе обладают высокой ударной вязкостью и малой чувствительностью к повреждениям. Недостатки – это сорбирование влаги, снижающее прочность на 15...20 %, и низкая прочность в поперечном направлении. Полиэтиленовые волокна обладают низкой плотностью (менее 1 г/см³), химической инертностью, при этом их упругопластические свойства находятся на уровне арамидных волокон. К недостаткам относится невысокая температура эксплуатации (менее 100 °С).

Арамидные волокна формируются следующим образом: раствор очищенного полимера в сильной кислоте ekstrудировается через фильеру при температуре 50...100 °С и после прохождения воздушной прослойки 5...19 мм попадает в осадительную ванну с охлажденной до температуры 0...4 °С водой. После тщательной промывки нити волокна высушиваются и наматываются на бобину. Высокопрочные волокна подвергают дополнительной термовытяжке, увеличивающей модуль упругости на 15...20 %.

1.3.5. ГИБРИДНЫЕ КОМПОЗИТЫ

Гибридные композиты, совмещающие два и более типа волокон, позволяют расширить возможности создания материалов с заданными свойствами. Волокна смешиваются в пределах одного слоя или укла-

дываются чередующимися слоями. При сочетании волокон с приблизительно одинаковыми деформационными характеристиками (органо-стеклопластики и углеборопластики) свойства материала соответствуют принципу аддитивности. При сочетании волокон с различными деформационными свойствами предельная деформация определяется преобладающим материалом.

Приведем примеры наиболее рационального сочетания разномодульных волокон.

- Совмещение стеклянных и органических волокон позволяет получать материалы с более высокой прочностью при сжатии и сдвиге по сравнению с органопластиком и повысить характеристики при растяжении по сравнению со стеклопластиком.
- Гибридный композит на основе стеклянных и углеродных волокон обладает более высоким модулем упругости по сравнению со стеклопластиком, при этом сохраняются удельные характеристики прочности при сжатии и незначительно снижаются при растяжении.
- Добавление борных волокон в стеклопластики позволяет существенно повысить модуль упругости, при этом сохраняется или повышается прочность материала при сжатии.

Одна из разновидностей гибридных ПКМ – это градиентные ПКМ, свойства и структура которых пространственно неоднородны, что позволяет создавать равнопрочные конструкции.

1.3.6. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Одним из важнейших направлений развития материаловедения является разработка на основе достижений наукоемких технологий материалов третьего поколения – интеллектуальных полимерных композиционных материалов (ИПКМ). К материалам первого поколения относятся изотропные материалы, которые могут быть однофазными (конструкционные металлические сплавы, полимеры) и гетерофазными (полимеры, наполненные дисперсно расположенными короткими волокнами, порошком и т. д.), сохраняющими изотропность на макроуровне. Материалы второго поколения – волокнистые (наполненные непрерывным волокном) полимерные композиционные материалы, гетерофазные композиции с планируемой анизотропией, которая является первым этапом интеллектуализации.

Материалы третьего поколения могут адекватно реагировать на изменяющиеся внешние воздействия и корректировать свои свойства до уровня, оптимально соответствующего изменяющимся условиям. Они способны демпфировать колебания, опасные вибрации, обнаруживать нарушения структурной целостности, снижать радиолокационную заметность.

Самодиагностирующиеся ИПКМ – это материалы, которые сами контролируют свое состояние по следующей схеме: получение сигнала от конформного датчика о возникших в материале изменениях, идентификация сигнала и принятие решения человеком. Например, в самодиагностирующихся ИПКМ конструкционного назначения самоконтроль возникновения усталостных трещин выполняется с помощью следующих датчиков:

- датчиков сопротивления (разрывы волокон наполнителя увеличивают сопротивление датчика);
- пьезодатчиков, улавливающих акустические волны, появляющиеся в момент возникновения дефекта;
- оптических волокон: для самодиагностики ИПКМ эффективно применение волоконных оптических волноводов, непосредственно встроенных в конструкцию ПКМ. В случае возникновения дефекта (трещины) в конструкции световые сигналы, передаваемые по волоконным волноводам, обрабатываются с помощью микропроцессоров, информация воспроизводится на дисплее или с помощью речевого синтезатора.

Таким образом, в состав самодиагностирующихся ИПКМ входят различные конформные микродатчики и сенсоры, системы передачи сигнала, системы анализа и информации. Решение по возникшей ситуации принимает человек.

В адаптирующихся ИПКМ используются компоненты, способные изменять свои свойства и геометрию конструкции известным и контролируемым способом. В конструкционных ИПКМ осуществляется анализ внешних воздействий и управление их эксплуатационными характеристиками с помощью конформных актюаторов, реагирующих на изменение частоты собственных колебаний структурных элементов ПКМ и выводящих их на требуемый уровень. Это дает возможность контролировать вибрацию, регулировать размеры элементов конструкции, вести акустический контроль, регулировать термическое расширение (сжатие), предотвращать образование и распространение трещин, снижать радиолокационную заметность.

Для этого существует несколько способов.

- Введение наряду с армирующими волокнами в структуру ПКМ волокон или лент (до 15 % объема) из металлов с «памятью» формы. Под эффектом «памяти» формы понимают способность некоторых материалов и конструкций к изменению и последующему восстановлению их первоначальной формы и размеров после термического или другого внешнего воздействия. При охлаждении деталь из таких сплавов самопроизвольно принимает одну форму, при нагреве – возвращается к исходной. В зависимости от вида материала изделия различного вида и конфигурации сгибаются, расширяются, извиваются и т. д. (форму можно программировать).

- Использование полимер-полимерных матриц (полиматричные ПКМ), в которых одним из компонентов матрицы служит полимер с «памятью» для «залечивания» дефектов (например, под действием напряжения макромолекулы некоторых полимеров способны изменить конформацию – переменное распределение в пространстве атомов и атомных групп, составляющих макромолекулу), при этом реализуется переход от кристаллов с выпрямленными цепями к кристаллам складчатой формы, что приводит к изменению объема.

- Введение в матрицу пьезоэлектрических волокон. При возникновении циклической деформирующей силы напряжение передается пьезоэлектрическим волокнам, сжимает и растягивает их. При этом механическая энергия преобразуется в электрическое напряжение, которое принимается встроенным микрочипом и по величине соответствует тому, которое необходимо для возбуждения вызвавшей его деформации. Это напряжение подается на волокна, заставляя их соответственно растягиваться и сжиматься, что приводит к возникновению противодействующего момента, гасящего вибрацию.

- Введение в «интеллектуальную» оболочку конструкций самолетов пятого поколения устройств, управляющих рассеиванием радиоволн, – фазированных антенных решеток (ФАР). ФАР обеспечивают программируемое изменение характеристик отраженных радиолокационных сигналов и снижают эффективную площадь рассеивания до $0,04 \text{ м}^2$, что делает самолет практически невидимым для современных радиолокационных устройств. Это является одним из элементов технологии снижения радиолокационной заметности.

ИПКМ перспективны для дальнейшего совершенствования летательных аппаратов. Улучшение аэродинамических характеристик связывают с использованием (к 2030 году) аэроактивных крыльев (AAW,

США), которые могут изменять свою форму в зависимости от условий полета. Для ААW крыльев нужны оболочки, способные изменять свою форму на основе ИПКМ, в структуре которых могут быть размещены пьезоэлектрические элементы и полимерные магниты (магнитоэластичные аморфные материалы с прямым и обратным преобразованием электрической энергии в механическую, с наполнителями из порошков самарий-кобальтовых сплавов).

1.4. СЛОИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Появление этого нового и перспективного семейства гибридных ПКМ стало заменой монолитных алюминиевых листов для повышения прочности, живучести и надежности авиационных конструкций. Эти материалы превосходят монолитные по сопротивлению усталости, вязкости разрушения, статическим механическим свойствам, ударостойкости и огнестойкости; кроме этого, они имеют более низкую плотность. Большое разнообразие структур и свойств алюмополимерных материалов (АПМ) (рис. 8) дает возможность конструктору выбрать соответствующий материал для своих целей, который позволит заменить тонкую подкрепленную оболочку гладким листом, кроме того, можно регулировать жесткость листа, изменяя его толщину.

Важнейшим преимуществом АПМ перед монолитным алюминием является высокая трещиностойкость – высокое сопротивление росту трещины усталости, определяющее живучесть самолетной конструкции.

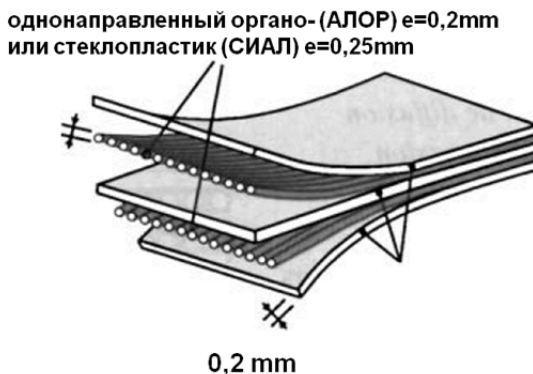


Рис. 8. Строение алюмополимерного материала

Зарождающаяся в алюминиевых листах трещина растет очень медленно и может остановиться при длине в несколько миллиметров (1...5 мм). Сильное замедление или прекращение разрушения объясняется тем, что позади вершины движущейся трещины в тонких алюминиевых листах армирующие волокна остаются целыми и сдерживают раскрытие трещины, а также снимают часть нагрузки с листов. Определенным барьером для продвижения трещины служит связующее.

Сочетание высокой трещиностойкости и удельной прочности, хороших усталостных и коррозионных характеристик делает АПМ перспективным материалом для планера (обшивок фюзеляжа, крыла и т. д.) самолетов следующего поколения (табл. 7).

Таблица 7

Свойства алюмополимерных материалов

Материал, характеристика	Плотность ρ , кг/м ³	Прочность при растяжении σ , МПа	Модуль упругости E , ГПа
АЛОР Д16/41, трехслойный, наполнитель СВМ	2,35	450	62
АЛОР Д16/41-Н, однонаправленный, трехслойный, наполнитель СВМ	2,35	700	69
АЛОР $S = 1,5$ мм, трехслойный наполнитель «Армос» (нить)	—	1220	70
СИАЛ-1Н однонаправленный, структура 3/2, Д16-АТ, наполнитель стекло ВМП	2,5	1000...1200	60...65
СИАЛ-1Н однонаправленный, структура 2/1, В95, наполнитель стекло АБС	2,5	1100...1300	60...65
Д16-АТ	2,78	420	68
В95	2,78	520	72

1.4.1. АЛОП (ARALL)

АЛОПы (аббревиатура от названия компонентов: АЛюминий, ОРганопластик, Aramid Reinforced ALuminum Laminate) состоят из тонких слоев алюминиевого сплава Д16-АТ и слоев органопластика на основе наполнителей из высокопрочных арамидных волокон (нитей, жгутов, тканей). Основные достоинства АЛОПов – низкая скорость распространения усталостных трещин и высокие ресурсные характеристики при воздействии вибрационных и акустических нагрузок [9].

В качестве наполнителя в органопластике в АЛОПе может быть использована арамидная ткань СВМ, как в обычном органопластике. Но наиболее перспективны материалы на основе арамидов нового поколения – волокна «Армос» и «Русар» с прочностью при растяжении на 20...30 % выше, чем у серийного волокна СВМ. Как показали исследования, проведенные в ВИАМе, металлоорганопластик на основе этих волокон имеет прочность более 1200 МПа, что соответствует уровню прочности титановых сплавов, а по удельной прочности превосходит их в два раза.

Из АЛОПа изготовлены обшивки носовой части самолета Ан-124, а также ремонтные стопперы для поврежденных обшивок (стопперы предназначены для торможения развития усталостных трещин в элементах конструкции). Опыт эксплуатации этого изделия показал, что ресурс обшивок из АЛОПа в 10 раз превышает ресурс аналогичных конструкций из алюминиевых сплавов.

Сложность получения препрегов из АЛОПов состоит в особенностях самих арамидных волокон: низкая формоустойчивость нитей, возможность искривления их в препреге в процессе сочетания их с полимерной матрицей. В связи с этим ВИАМом предложен двухступенчатый процесс получения однонаправленного препрега.

ЭТАП I. Проведение предварительного аппретирования арамидного наполнителя в напряженном состоянии с целью повышения формоустойчивости нити и улучшения их пропитываемости.

ЭТАП II. Пропитка аппретированного наполнителя пленочным связующим методом прямого или вакуумного формования.

В зависимости от типа армирующего материала (нить или ткань) предложены два способа изготовления однонаправленного полуфабриката:

- получение препрега путем намотки аппретированной нити на оправку с последующим дублированием пленочным связующим;

- предварительное аппретирование однонаправленной ткани в пропиточной машине с последующим дублированием пленочным связующим.

1.4.2. СИАЛ (GLARE)

СИАЛ (аббревиатура от названия компонентов: Стеклопластик И Алюминий, Glass REinforced) представляет собой листовой АПМ, состоящий из чередующихся слоев конструкционных алюминиевых сплавов Д16АТ, В95АТ, 1163АТ толщиной 0,25...0,5 мм и внутренних слоев клеевого препрега толщиной 0,3...0,5 мм, армированного стекловолокном с различной структурой. Общая толщина АПМ составляет от 0,8 до 2,0 мм. Такой материал применяется при изготовлении обшивок верхней части фюзеляжа Airbus A380.

Число и соотношение слоев, толщина, строение слоя стеклопластика, состав и состояние поверхности алюминиевых слоев зависят от назначения АПМ. Наиболее типичные структуры: пятислойная (обозначение 3/2 – три алюминиевых листа, два слоя стеклопластика) и трехслойная (обозначение 2/1 – два слоя алюминиевого сплава, один слой стеклопластика). Необходимая степень анизотропии в соответствии с условиями работы конструкции регулируется перекрестным армированием слоев стеклопластика. Например, СИАЛ-2 ~70 % стекловолокна в одном направлении, 30 % – в перпендикулярном; СИАЛ-3 – 50 и 50 % соответственно; СИАЛ-1 – однонаправленный стеклопластик.

Кроме обычных свойств, характерных для всех АПМ, СИАЛы обладают высоким сопротивлением влагопоглощению и ударостойкостью. По сравнению с АПМ первого поколения класса АЛОР СИАЛы обладают преимуществом по прочности при растяжении и особенно при сжатии и смятии.

Чрезвычайно высокое сопротивление СИАЛов развитию усталостных трещин, высокие прочностные показатели, коррозионные характеристики позволяют использовать их как в качестве конструкционного материала для изготовления элементов планера, так и в качестве стоперов трещин при проведении ремонта существующей авиационной техники.

1.5. ПАНЕЛИ С ГАЗОНАПОЛНЕННЫМИ И СОТОВЫМИ ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ

Многослойные панели, состоящие из тонких прочных внешних слоев и расположенного между ними легкого заполнителя, являются одним из оптимальных видов конструктивных элементов. Это связано с тем, что подобные конструкции эффективно воспринимают внешнюю нагрузку и обеспечивают хорошую шумо- и теплоизоляцию.

Существует множество схем классификации легких заполнителей, но в первую очередь их можно разделить на сплошные (пенопласты) и различные объемные конструкции из тонких листовых материалов (соты, ячейки, трубчатые элементы и т. д.); кроме того, существуют комбинации подобных заполнителей (пеносотопласты) и часто края слоя сот наполняют вспенивающимися композициями для увеличения жесткости (рис. 9).

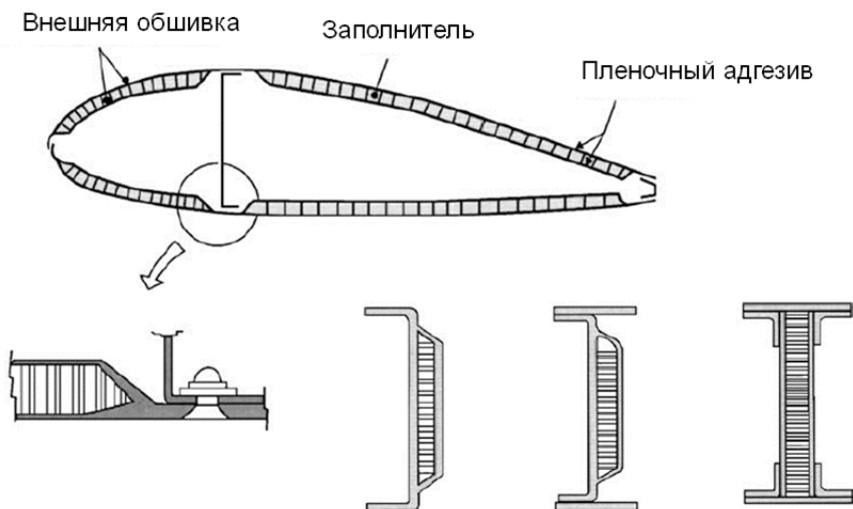


Рис. 9. Пример использования сотовых конструкций в крыле самолета

Применять вспенивающиеся заполнители можно двумя методами. В первом из типовых листов пенопласта вырезаются вкладыши нужной формы и вклеиваются между обшивками. Во втором случае сотовый заполнитель образуется в полости изделия в результате вспени-

вания композиции. Вспенивающаяся масса обладает достаточным давлением ($3 \dots 5 \text{ кг/см}^2$) для надежного заполнения полостей и адгезией к элементам конструкции. Достоинство метода – в отсутствии операции по механической обработке пористого заполнителя и подгонке под обводы каркаса. Недостаток – усадка вспенивающегося заполнителя при больших толщинах, поэтому в исходную композицию вводятся специальные добавки или используется комбинированный метод, при котором основной объем заполняется вкладышем из пенопласта.

При всех своих достоинствах заполнитель из пенопласта имеет низкую сдвиговую прочность и прочность на растяжение, т. е. разрушение происходит по заполнителю, поэтому актуальным становится усиление пенопластовых заполнителей более прочными элементами. Наиболее распространенные способы усиления:

- прошивка пенопластового блока жгутами;
- установка вставок различных форм между листами обшивки;
- использование трубчатых элементов, лежащих в плоскости обшивки.

Сотовые заполнители представляют собой регулярную структуру, образованную одинаковыми ячейками различной формы. Наибольшее распространение получили шестигранные и прямоугольные ячейки, получаемые растяжением из шестигранных. Соты могут производиться различными методами из листового материала, из полимерных бумаг типа Nomex, алюминиевой фольги (склейка, сварка) или методом объемного ткачества. Типовая конструкция сот состоит из листов обшивки с нанесенным на внутренние стороны адгезионным слоем и сотовым заполнителем между ними. Важно то, что для увеличения площади склеиваемых поверхностей адгезионный слой может вспениваться.

Недостатком сот является образование замкнутого объема и, как следствие, появление в нем конденсата. Решением этой проблемы является перфорация стенок сот. Другой недостаток – это появление седлообразности при укладке сот на кривые поверхности. При этом возможно искажение форм сот, их разрушение в зоне склейки, а также потеря устойчивости стенок сот. Это решается разрезанием сот на сегменты с небольшой кривизной и укладкой их по отдельности, при этом зазоры между сотами заполняются вспенивающимся клеем (рис. 10).

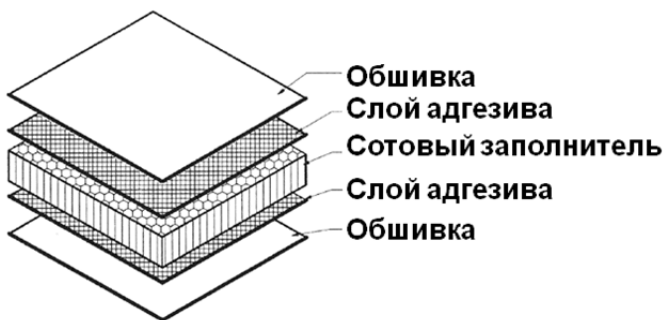


Рис. 10. Строение сотовой панели

Указанных недостатков лишен наполнитель типа гипар, выполненный из армированных пластиков (гипар – гиперboloид вращения). Гипар легко укладывается на любые поверхности, в том числе и двойной кривизны. Особенность гипара в том, что поверхность его ячейки близка к плоской развертке, а это позволяет получать гипар из композитов, арматура которых не допускает вытяжки.

1.6. ПРЕПРЕГИ

Методы изготовления элементов конструкций из ПКМ можно условно разделить на прямые и не прямые. К прямым методам относится изготовление изделий непосредственно из исходных составляющих композиции без процесса получения полуфабрикатов. Прямые методы – более сложные; так как процессы формования и формообразования совмещены, то для получения изделий со стабильно воспроизводимыми характеристиками приходится одновременно контролировать значительное число разнородных технологических параметров.

Непрямыми методами изготовления называются методы, в которых конструкции изготавливаются из полуфабрикатов. В этом случае пропитка связующим армирующего материала – это отдельная самостоятельная операция. В этом случае получаемый пропитанный армирующий материал называют препрегом. Достоинством является выделение производства препрегов в отдельное специализированное производство.

Процесс получения препрега можно разделить на следующие этапы: проверка на соответствие, расшлихтовка, аппретирование, нанесение связующего, удаление лишнего связующего, сушка и упаковка.

Проверка наполнителя заключается в контроле механических свойств и содержания влаги согласно производственным инструкциям и другим нормативным документам.

Расшлихтовка – удаление замасливателей. Выполняется с помощью термообработки, промывки и экстрагирования (кипячения в растворителе). Промывка осуществляется в водных растворах моющих средств, а также в растворителях типа бензина, толуола и т. д.

Аппретирование – химическая обработка, которая улучшает адгезию матрицы к наполнителю. Аппретирование позволяет повысить прочность ПКМ до 30 %.

В состав связующего входят полимерные смолы, катализаторы (отвердители), модификаторы, пластификаторы, растворители и разбавители. Растворители и разбавители служат для улучшения технологических свойств и снижения вязкости связующего. Растворители испаряются на этапе сушки преперега, а разбавители остаются в связующем и изменяют свойства композиции, являясь модификатором.

Связующее может наноситься:

- свободной подачей связующего на поверхность арматуры;
- свободным съемом связующего с поверхности ванны или валика;
- погружением или пропиткой;
- вдавливанием связующего в арматуру с помощью ножей или подвижного инструмента.

Излишки связующего удаляются с помощью отжимных роликов и сдува струей воздуха. Сушка может выполняться конвективным или кондуктивным способом. Полученный препрег прокладывается полиэтиленовой пленкой и помещается в герметичную тару и в таком виде может храниться в холодильнике в течение нескольких месяцев, сохраняя свои технологические свойства.

Всего разделяют три стадии затвердевания преперега.

1. Ранняя стадия, когда материал может плавиться и растворяться.
2. Промежуточная стадия, когда материал полностью уже не растворяется, но может набухать и размягчаться при нагревании.
3. Конечная стадия, при которой материал уже не может размягчаться и растворяться и набухать в растворителях.

Наиболее распространен жидкофазный способ получения препрегов (рис. 11), который заключается в нанесении связующих на волокна (нити, жгуты, ленты, ткани) из растворов или расплавов. В этом случае качество пропитки зависит от вязкости связующего. Однако возможности снижения вязкости термопластичных связующих ограничены

допустимыми температурами расплавов. Поэтому для такого способа получения препрегов характерна высокая пористость, превышающая в 10...15 раз пористость композитов на термореактивных связующих.

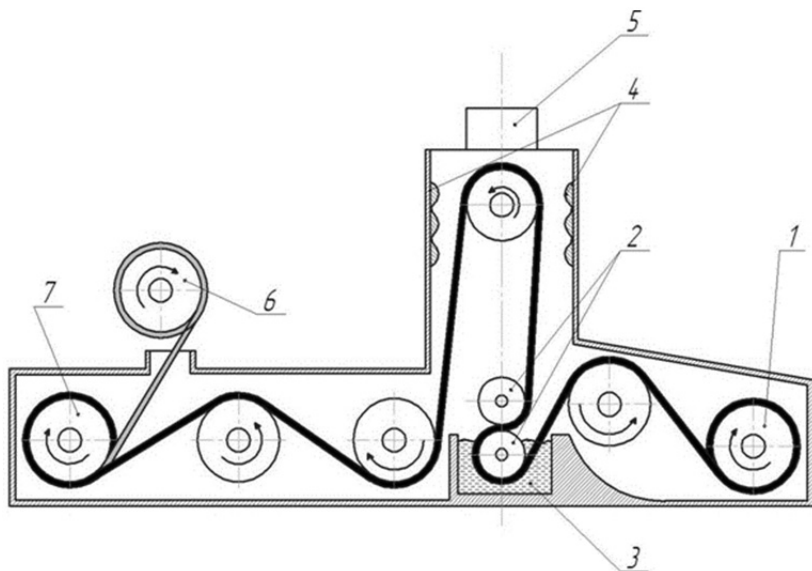


Рис. 11. Принципиальная схема пропиточной машины:

1 – бобина с тканью (лентой, ровингом); 2 – отжимные валки; 3 – ванна с раствором связующего; 4 – нагреватели; 5 – вытяжная вентиляция с отстойником для растворителя; 6 – бобина с полиэтиленовой пленкой; 7 – препрег

При твердофазном совмещении армирующие волокна сочетаются с термoplastами в виде порошка, пленки или волокон. Основное преимущество способа по сравнению с жидкофазным совмещением состоит в том, что еще до пропитки достигается проникновение матричных компонентов в объем волокнистых наполнителей и тем самым повышается эффективность последующей пропитки при плавлении твердых матричных включений: сокращается время пропитки, снижаются энергетические затраты, уменьшается пористость композита.

Использование порошков не позволяет получить ПКМ с равномерной степенью армирования по всему объему материала. Пленочные связующие лишены этого недостатка, они позволяют послойно чередовать термoplastичные пленки с армирующими элементами. Глубина

пропитки существенно зависит от толщины армирующих нитей, жгутов, лент, а также от сложности формируемого изделия.

Матричные термопластичные волокна наиболее результативны при совмещении компонентов. Их использование позволяет создавать композиты с заданной регулярностью структуры, надежной фиксацией схемы армирования на всех стадиях переработки. Изделия на основе таких волокон можно изготавливать различными технологическими методами: выкладкой, намоткой, пултрузией, а совмещение волокон с армирующими компонентами достигается при ткачестве, плетении. Применение матричных термопластичных волокон позволяет получать сверхвысокоармированные композиты с предельной степенью армирования и низкой пористостью (до 0,25 % объема изделия), а в некоторых случаях создавать безматричные композиты за счет их сварки.

Прочность однонаправленного композита будет ниже прочности элементарного волокна, армирующего материал. Если рассмотреть график (рис. 12), то можно заметить, что при добавлении в матрицу волокон ее прочность падает. Это объясняется тем, что волокна ведут себя как концентраторы напряжений, снижая прочность матрицы, тем самым разрушение композита происходит без разрушения волокна. Далее с ростом доли армирующего материала начинается повышение прочности композита до определенного момента (примерно 78,5 % для однонаправленного материала), после чего опять снижаются прочностные характеристики композита. Очевидно, что прочность композита, состоящего на 100 % из армирующих волокон, не будет равна прочности элементарной нити, так как невозможно добиться равномерного распределения нагрузки по всем нитям. В этом случае матрица помогает более равномерно распределять нагрузку между волокнами. Если рассмотреть элементарную ячейку плотной упаковки волокон, то можно увидеть, что для случая однонаправленного композита оптимальная доля волокон составляет 78,5 % от всего объема материала. Дальнейшее повышение приводит к «голоду» по связующему и разрушению поверхности армирующих волокон, что снижает прочность композита. В результате можно дать следующие рекомендации:

- для неотчетственных деталей коэффициент наполнения принимать 35...45 %;
- для слабонагруженных деталей – 45...55 %;
- для ответственных деталей – 55...65 %;
- для высоконагруженных деталей – 65...75 %.

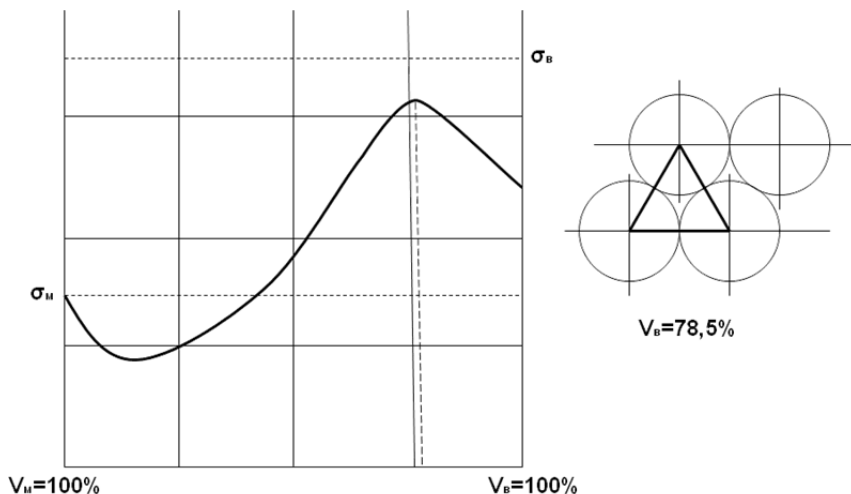


Рис. 12. Зависимость прочности композита σ от объемной концентрации армирующих волокон V_v

Для изготовления силовых конструкций, в том числе сотовых, применяются клеевые препреги. Они представляют собой рулон наполнителя в виде ткани или ленты с нанесенным слоем специального клея. Рулон упакован в два слоя полиэтиленовой пленки и запаян в полиэтиленовый мешок. При сборке сотовых конструкций им заменяют пленочные клеи.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные отличия свойств ПКМ от сплавов, применяемых в авиастроении?
2. Из каких основных компонентов состоит ПКМ, каковы их свойства и назначение?
3. Что такое препрег?
4. С какой целью в конструкциях ЛА применяют панели с сотовым наполнителем?
5. При каком соотношении связующего и армирующего материала ПКМ обладает наибольшей прочностью?

2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

2.1. ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА

Главная особенность производства изделий из ПКМ в том, что одновременно производится не только сама деталь, но и материал, из которого она состоит, поэтому контролю подвергается не только сама деталь, но и материал, из которого она изготовлена. Из-за невозможности достаточно точно прогнозировать конечные свойства материала необходимо использовать образцы-свидетели, которые проходят полный технологический цикл изделия и подвергаются разрушающему контролю для определения механических характеристик. Для этого в конструкцию изделия специально закладывают место для образцов-свидетелей либо они создаются отдельно и проходят весь технологический цикл вместе с деталью.

Другая особенность – это ярко выраженная анизотропия свойств композиционного изделия, что дает возможность создавать равнопрочные изделия, но, с другой стороны, требует соблюдения точного направления укладки армирующего материала при производстве. Свойства деталей из ПКМ могут изменяться в широком диапазоне в зависимости от их конструкции и технологии изготовления.

Немаловажным фактором является также точность получаемой детали, которую снижают погрешности, связанные с разницей термического расширения изделия и оснасткой, а также усадкой матрицы и напряжениями в армирующем материале.

На трудоемкость, прочность и себестоимость изделия влияют выбор способа получения изделия, исходный материал, особенности геометрии изделия и множество других факторов.

Типовая подготовка к производству деталей из ПКМ заключается в изготовлении оснастки и раскрое материала (в случае изготовления изделий намоткой раскрой не нужен, поскольку исходным материалом служит ровинг или нить).

Расчет раскроя и драпировки – наиболее сложная и трудоемкая задача, особенно в случае изделий, обладающих двойной кривизной. Исходными данными при этом являются чертежи с укладкой слоев, направлением армирования каждого слоя и теоретический контур (мастер-геометрия) (рис. 13) изделия. Для точного раскроя необходимо учитывать не только деформацию ткани и ориентацию ее слоев, но и их толщину, что требует специального программного обеспечения. Каждый слой (рис. 14) имеет свой порядковый номер, начинающийся от оснастки, и ориентацию армирующих волокон.

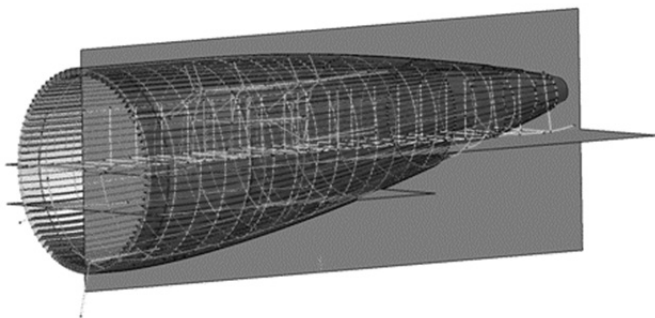


Рис. 13. Мастер-геометрия изделия

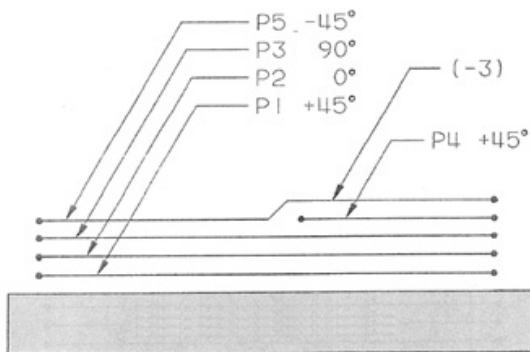


Рис. 14. Схема укладки и ориентации слоев

Слои больших размеров, которые невозможно изготовить из целого листа, допускается изготавливать из отдельных элементов. Такие случаи

прописываются в производственных инструкциях. Обычно перекрытие составляет 20 мм на внешних слоях, на внутренних допускается укладывать слои встык вдоль направления армирующих волокон.

Раскрой материала ведется по шаблонам с помощью ножниц или резака. Для промышленной вырезки существуют ультразвуковые раскройные машины с программным управлением, которые разрезают материал с помощью лезвия, колеблющегося с ультразвуковой частотой, и на вырезанную деталь наносят ярлык с маркировкой слоя. В дальнейшем ярлык удаляется при выкладке. Раскрой выполняется только механическим резанием, так как при гидроструйной резке волокна впиваются в воду, что снижает их прочность, а при резке лазером препрега происходит реакция сшивки на границах реза.

При проектировании оснастки, особенно такой, которая подвергается нагреву вместе с изделием, необходимо учитывать множество факторов. Главным фактором, влияющим на точность и качество изделия, является учет теплового расширения оснастки, кроме того, необходимо обеспечить минимальный перепад температуры по всей поверхности оснастки для равномерного нагрева и охлаждения изделия, поэтому предпочтительней использовать тонкостенные конструкции.

Наиболее важные критерии для выбора материала оснастки – это:

- стоимость;
- долговечность;
- стабильность геометрических параметров.

Для изготовления оснастки используются следующие материалы (табл. 8).

Таблица 8

Материалы оснастки и их свойства

Материал оснастки	Коэффициент термического расширения	Теплопроводность	Относительная стоимость	Стоимость обработки	Долговечность
Алюминий	Большой	Хорошая	Средняя	Средняя	Средняя
Сталь	Средний	Хорошая	Средняя	Высокая	Большая
Инвар	Небольшой	Небольшая	Высокая	Высокая	Большая
Углепластик	Небольшой	Небольшая	Высокая	Высокая	Небольшая

Материал оснастки	Коэффициент термического расширения	Теплопроводность	Относительная стоимость	Стоимость обработки	Долговечность
Стеклопластик	Небольшой	Небольшая	Средняя	Средняя	Небольшая
Керамика	Небольшой	Небольшая	Высокая	Высокая	Средняя
Никель	Небольшой	Средняя	Высокая	Средняя	Высокая

В основном распространена металлическая оснастка из-за дешевизны и долговечности. Алюминий – наиболее легкий и простой в обработке материал, обладающий хорошей теплопроводностью. Одним из недостатков, но в то же время достоинством является коэффициент его термического расширения. С одной стороны, это ограничивает размеры, сложность обводов, точность и максимальную температуру нагрева оснастки 200 °С, с другой – позволяет использовать алюминиевые оправки для создания внутреннего давления на формуемую деталь. Стальная (или титановая) оснастка позволяет повысить размеры и температуру обработки, но все же обладает значительным коэффициентом термического расширения. Стальная оснастка тяжелее алюминиевой, но это проблема решается созданием вентилируемой оболочечной оснастки с ребрами жесткости. При использовании ребер жесткости необходимо учитывать их воздействие на процесс остывания оснастки. Оснастка из инвара имеет практически нулевой коэффициент термического расширения, но небольшую теплопроводность. К недостаткам можно отнести высокую стоимость, сложность со сваркой и необходимость использовать фитинги из инвара для обеспечения герметичности. Стоит также отметить, что в настоящее время в России инвар не производится.

Композитная оснастка обладает рядом преимуществ: малым коэффициентом термического расширения, соизмеримым с деталью; дешевле в изготовлении; малым весом. К недостаткам относится недолговечность (ограниченность циклов нагрева-охлаждения).

Поверхности оснастки покрываются антиадгезионным покрытием или между оснасткой и изделием выкладывается антиадгезионная пленка. В качестве антиадгезионных смазок может быть использован пастообразный парафин (до температуры 121 °С), силиконовые смазки

(до температуры 204 °С), смазки на основе силановой смолы (до температуры 482 °С). В качестве разделительных пленок используются пленки из поливинилового спирта (121 °С), полиамидные (230 °С), полиимидные (316 °С), тефлоновые (политетрафторэтилен).

Подготовка оснастки для сборки пакетов состоит из следующих операций:

- чистка для удаления всех посторонних веществ;
- полировка для получения гладкой поверхности;
- протирка подходящим растворителем и сушка воздухом;
- нанесение соответствующего антиадгезива;
- нанесение гелякоата, который будет выполнять роль внешнего покрытия.

покрытия.

Укладка слоев (рис. 15) преимущественно производится вручную по разметке или с применением лазерных проецирующих систем. Лазерные системы позволяют повысить точность выкладки, убрать дополнительные операции разметки, снизить вероятность ошибки. Лазерная система позиционируется по маркам, расположенным на оснастке, и подсвечивает контур укладываемого слоя. Частично процесс выкладки автоматизируется с использованием укладочных машин с ЧПУ. Укладочные машины работают только с лентами, причем сами производят обрезку ленты, при этом имеют ограничения по сложности геометрии. Несмотря на то что выкладка лентой менее производительна, чем тканью, применение укладочных машин существенно сокращает процесс выкладки.

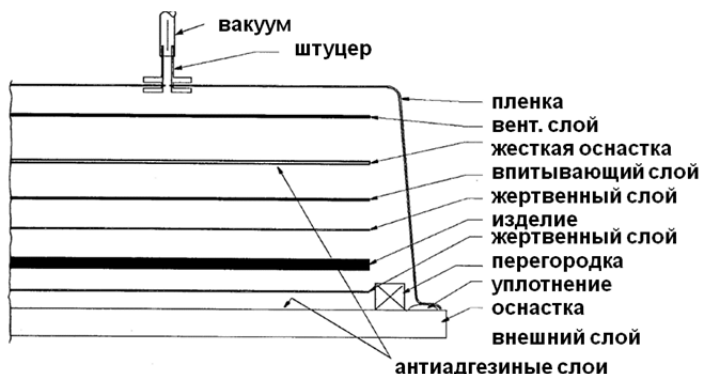


Рис. 15. Типовая схема укладки пакета

Набранный пакет накрывается антиадгезионным материалом, перфорированным для вытекания излишков смолы. В некоторых случаях на разделительный слой помещают пористые впитывающие слои стекломатов или стеклотканей, а поверх них – перфорированные слои пленки или грубой ткани, выполняющие вентиляционные функции и обеспечивающие неприлипаемость эластичного мешка к пакету. Для уплотнения пакета и удаления воздуха производится промежуточное вакуумирование.

2.2. ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

Для удовлетворения требований технологичности деталь из ПКМ должна обеспечивать:

- возможность снятия отформованных деталей с технологической оснастки (пуансонов, матриц, оправок), для чего должны быть предусмотрены пресовые уклоны или конусность детали (минимум 2°), а также учтена разница в коэффициентах линейного расширения материалов оснастки и детали из ПКМ, а также их внутренних напряжений;
- возможность применения наиболее простой формы оснастки (оправки), для чего поверхности деталей должны быть по возможности наиболее простыми по конфигурации.

Для достижения однородной усадки, устранения коробления, для предотвращения концентрации напряжений и, как следствие, расслоения материала рекомендуется не делать резких переходов толщины, а изменять ее постепенно, укладывая слои ступенчато (рис. 16).

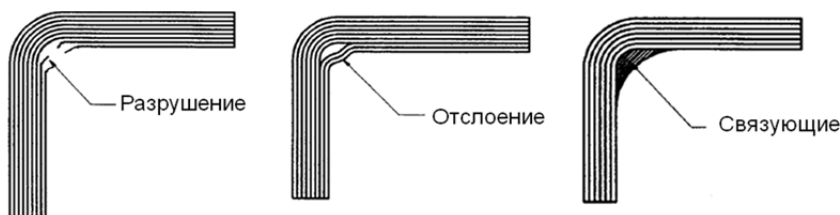


Рис. 16. Дефекты, возникающие при укладке по радиусу, меньшему допустимого

При наличии внутренних прямых углов, выполненных без закруглений, ПКМ не будет прилегать к поверхности формы; при наличии наружных прямых углов ПКМ тоже не сможет их плотно охватить.

Для предотвращения этих явлений рекомендуется закруглять внутренние и наружные углы по радиусу 4,75...12,75 мм.

При конструировании деталей из ПКМ чистовые размеры необходимо задавать с учетом изменения размеров набранного пакета после его формования.

Необходимо предусмотреть в конструкции возможность использования приемов, позволяющих увеличить жесткость детали с исключением или уменьшением потребности в последующем введении увеличивающих жесткость элементов (установка ребер жесткости, выпуклых вставок и т. д.), а также введение крепежных металлических элементов.

При проектировании тонколистовых обшивок для предотвращения «поводки» слои с различной ориентацией следует чередовать и располагать симметрично относительно среднего слоя.

Контроль отформованного изделия предполагает следующие операции:

- визуальное выявление раковин, отслоений, инородных включений;
- измерение шаблонами, калибрами, толщиномерами геометрических размеров изделия;
- проверка сплошности материала неразрушающими методами контроля;
- проверка плотности, пористости, содержания компонентов, прочностных показателей на соответствие чертежу и паспорту на материал (по образцам-свидетелям);
- взвешивание с точностью до 1 %.

2.3. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

2.3.1. ВАКУУМНЫЙ МЕТОД ОТВЕРЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Вакуумное формование с эластичной оболочкой может быть использовано для деталей любой конфигурации, в том числе для скорлупных деталей и любых деталей с двойной кривизной. Используется чаще всего в случаях, когда нельзя или нецелесообразно применять высокие давления формования.

Подготовленный к отверждению пакет помещают в вакуумный мешок (рис. 17) (под эластичную оболочку). Вакуумный мешок – это

система, которая обеспечивает равномерное распределение давления во всех зонах формируемого изделия и исключает образование застойных зон, вызывающих недопрессовку материала. Материал вакуумного мешка должен выдерживать температуру горячего отверждения и обладать невысокой газопроницаемостью для обеспечения постоянства давления при формообразовании. Наиболее пригодный материал – резина, но такие мешки недолговечны, разрушаются под действием смол и высокой температуры. Поэтому наибольшее распространение получили эластичные оболочки из полиимидных и полиамидных пленок.

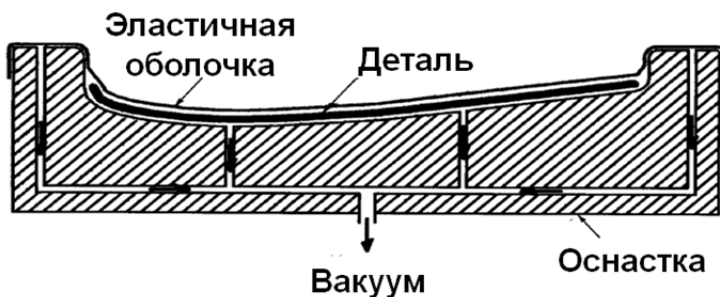


Рис. 17. Схема вакуумного формования

Эластичная оболочка, покрывающая набранный пакет, должна быть тщательно герметизирована по всему периметру герметизирующими жгутами, термостойкими герметиками, лентами с двусторонним липким слоем. Штуцеры для подсоединения к вакуумной линии и манометрам обычно вплавляют или клеивают внутрь диафрагмы при ее изготовлении. Количество штуцеров на вакуумном мешке определяется из условия равномерного обжатия формируемого изделия.

Благодаря образующемуся перепаду давлений с разных сторон эластичной оболочки изделию придается необходимая форма и оно уплотняется за счет устранения пустот и удаления излишков смолы. Вентиляционная система, связанная с атмосферой или вакуумом, предназначена для вывода захваченного воздуха, побочных летучих продуктов отверждающегося материала и избытков смолы. Отверждение осуществляется в термошкафу. Основные параметры процесса: температура, давление, время выдержки, скорости нагрева/охлаждения.

2.3.2. ВАКУУМНО-АВТОКЛАВНОЕ ФОРМОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Автоклавы – герметичные сосуды, в которых можно создавать значительное давление порядка 15 атмосфер и температуру до 300 °С. Преимущество автоклавного формования состоит в том, что благодаря значительным объемам нагреваемой камеры обеспечиваются:

- заданные равномерные температура и давление по всему объему независимо от формы и габаритов изделия;
- полимеризация партии деталей и агрегатов по одному режиму, зафиксированному на термограмме;
- возможность механизации работ при загрузке и выгрузке.

Автоклав (рис. 18) имеет системы создания и регулирования температуры и давления, аварийного сброса давления, управления скоростями нагрева, охлаждения, повышения и снижения давления, а также приборное обеспечение записи параметров процесса.

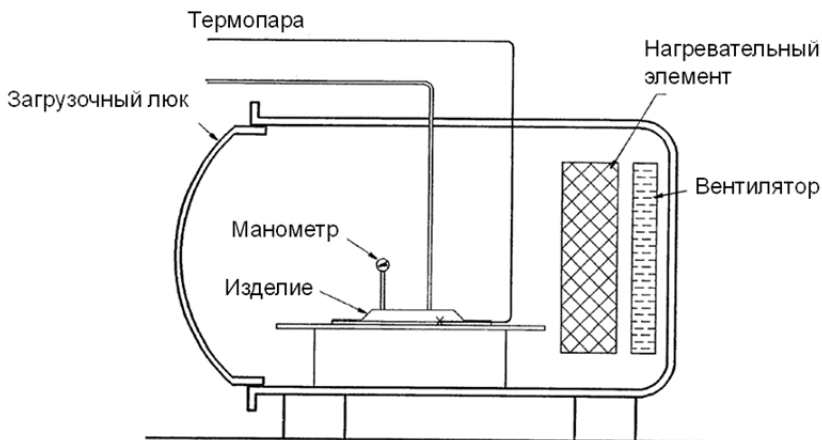


Рис. 18. Устройство автоклава

В автоклавах отверждают преимущественно крупногабаритные изделия, а также изделия, требующие повышенного качества. Серийно выпускаемые автоклавы имеют диаметр до 6 м и длину до 21 м.

К недостаткам автоклава стоит отнести высокие капитальные затраты и большие энергетические затраты при пересчете на одну деталь. Кроме того, автоклавы взрывоопасны. Тем не менее автоклав-

ное формование широко применяется в авиационной промышленности.

Пакет, набранный точно так же, как и при вакуумном формовании, в вакуумном мешке помещается на автоклавную тележку. Вакуумный мешок соединяется с вакуумной системой автоклава. Производится проверка герметичности вакуумного мешка: сначала при открытом автоклаве, затем при закрытом, с небольшим ($\sim 0,3$ МПа) избыточным давлением, затем давление в автоклаве сбрасывается и начинается рабочий цикл формования (рис. 19). В случае разгерметизации вакуумного мешка деталь, как правило, бракуется.



Рис. 19. Типовой цикл автоклавного формования изделия

В вакуумной системе создается давление $0,075 \dots 0,085$ МПа и начинается увеличение давления и температуры в автоклаве. В течение $20 \dots 30$ мин температура достигает ~ 80 °C, давление $\sim 0,3$ МПа; вакуум-насос отключается, а система вакуумирования мешков соединяется с атмосферой. Продолжаются постепенное повышение температуры и давления до заданных и выдержка в течение установленного времени. В течение всего процесса разброс температуры не должен превышать $\pm 0,5$ °C, а разброс давления — не выходить из пределов $0,025$ МПа по всему объему автоклава. Формуемый материал охлаждается до температуры $\sim 50 \dots 60$ °C со скоростью $0,5 \dots 1,0$ °C в минуту под давлением не менее $0,025$ МПа.

2.3.3. ПРЕССОВАНИЕ

Обычное прямое (компрессионное) (рис. 20) прессование применяется для изготовления деталей типа крышек, коробок простой формы и небольших габаритов. Прессование выполняется в пресс-формах на гидравлических прессах. Размеры деталей ограничены габаритами рабочей зоны прессы. При формовании сложно создать равномерное давление по всей площади детали, т. е. в плоскостях, расположенных не перпендикулярно к вертикальной оси штампа, будут действовать касательные усилия. В случае использования смол горячего отверждения эту проблему можно решить с помощью вкладышей из материала, имеющего большой коэффициент термического расширения – алюминия или кремнийорганической резины. Для лучшего заполнения формы препрегом давление к пресс-форме прилагается с несколькими подпрессовками – прикладывается несколько раз с разными амплитудами и продолжительностью. Прессование дает возможность получить изделия с хорошими качеством поверхности, однородной структурой, но по прочностным показателям они уступают деталям, изготовленным в автоклаве. Содержание армирующего материала при таком методе варьируется от 20 до 50 %.

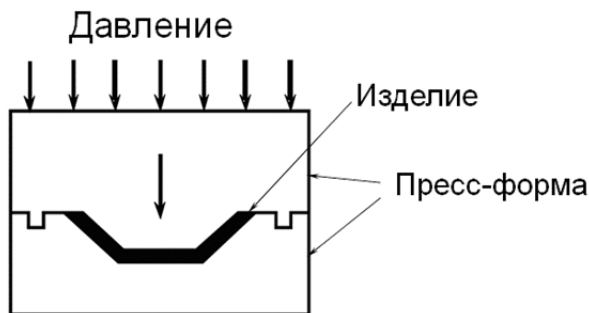


Рис. 20. Схема прямого прессования

Другой вариант прессования отличается тем, что формирующий элемент – пуансон – выполняется из эластичного теплоустойчивого материала, например, кремнийорганической резины. Достоинством этого метода является снижение стоимости оснастки за счет исключения операции подгонки матрицы и пуансона. Резина обладает малой теплопроводностью и создает более равномерное давление на пакет.

2.3.4. ПРОПИТКА ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Этот метод имеет несколько разновидностей, которые различаются применением/отсутствием вакуума и/или давления, а также оснасткой.

Сущность метода заключается в том, что армирующий материал, находящийся в полости пресс-формы, пропитывается подаваемым под давлением связующим. В форму, изготовленную с достаточно большой точностью, укладывается армирующая ткань. Зазор между пуансоном и матрицей равен толщине стенок изделия с необходимым допуском. Связующее подается под давлением в форму и постепенно заполняет пространство полости. Давление для пропитки создается нагнетанием в форму связующего под действием сжатого воздуха и/или вакуумированием. Оптимальный вариант – совмещение вакуумирования с нагнетанием. Для качественной пропитки следует регулировать и контролировать температуру, вязкость и скорость, с которой поднимается связующее. Скорость подъема связующего по форме ограничена условиями качественной пропитки. После того как связующее появляется в выводных отверстиях в верхней части формы, подачу связующего прекращают. Отверждение связующего производят в термошкафу или непосредственно в обогреваемой форме.

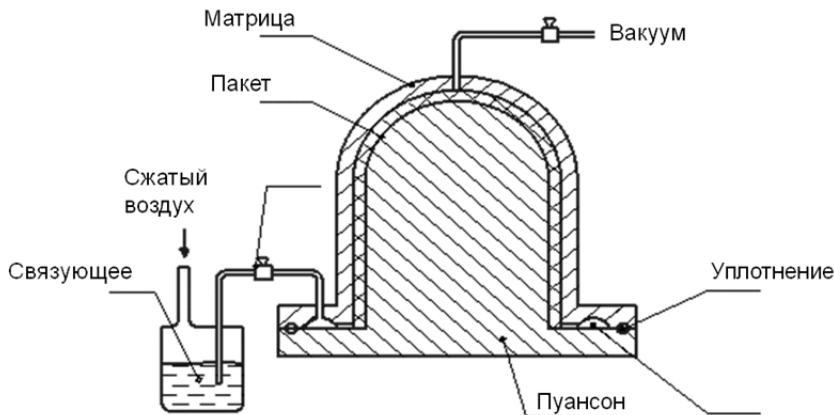


Рис. 21. Схема процесса пропитки под давлением

При пропитке связующее расширяет полость формы, что способствует равномерному заполнению им армирующего материала, тем самым компенсируя небольшие неравномерности заполнения укладки

армирующего материала. Скорость пропитки ограничена условием качественного заполнения пресс-формы связующим, без образования неотделившихся пузырьков воздуха и воздушных карманов. Кроме того, на образование воздушных карманов влияет форма полости и расположение входных и выходных отверстий.

Достоинствами такого метода является возможность получения высокопрочных изделий сложной формы с объемной долей армирующего материала порядка 65...70 %, гладкой поверхностью и не требующих дополнительной механической обработки. Кроме того, метод не требует больших капитальных вложений. С другой стороны, достаточно сложно спроектировать качественную форму и рассчитать режимы заполнения, поэтому затраты на отработку режимов могут быть значительными. Частично это решается с помощью компьютерного моделирования на этапе проектирования.

В качестве заготовок могут быть использованы не только пакеты, полученные методами сухой выкладки, но и изделия, полученные плетением, намоткой. Для оформления внутренних полостей используются металлические извлекаемые болванки, которые расширяясь, создают дополнительное давление.

Существует несколько вариаций процесса пропитки под давлением. Наиболее простая из них – пропитка с совмещением вакуумным формованием диафрагмой. Такой метод применяется главным образом в судостроении и автомобилестроении.

Другой недостаток – время жизнеспособности связующего. Для повышения текучести его подогревают, что уменьшает время жизнеспособности, поэтому в ряде случаев применяется схема, когда смола и отвердитель (катализатор) нагреваются в отдельных магистральных, а смешивание происходит непосредственно перед попаданием в канал пресс-формы.

2.3.5. ПУЛТРУЗИЯ

Пултрузия – технологический процесс формования длинномерных профильных деталей путем непрерывного протягивания армирующего материала, пропитанного связующим, через нагретую формующую фильеру (рис. 22). Этот процесс аналогичен процессу экструзии, в котором материал продавливается через формующую фильеру под действием давления, создаваемого в экструдере. При пултрузии материал протягивается через фильеру под действием внешней силы, создаваемой тянущим устройством, например фрикционными роликами.

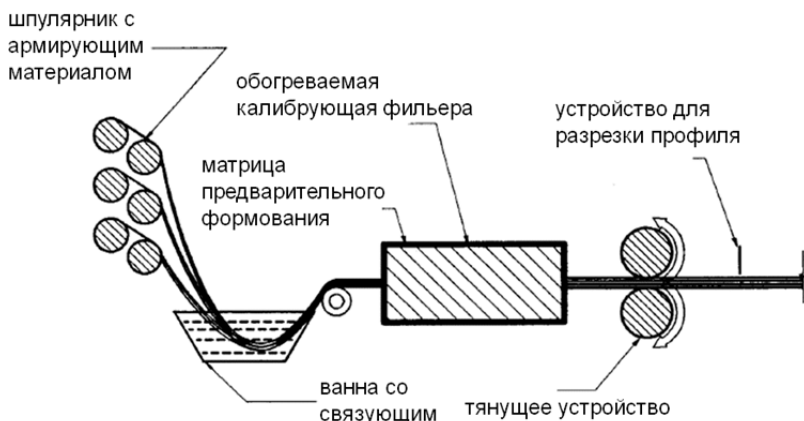


Рис. 22. Схема процесса пултрузии

Армирующий материал (жгуты, нити, тканые ленты) последовательно проходит через ванну с жидким связующим, пропитывается, сжимается и идет далее в матрицу предварительного формования, где постепенно преобразуется по сечению в форме получаемого конструктивного элемента. Окончательное сечение формируется в обогреваемой калибрующей фильере, в которой под действием нагрева происходит частичное отверждение связующего. Для завершения отверждения элемент дополнительно термообрабатывается в печи.

Материал протягивается по всему тракту формообразования с помощью какого-либо тянущего устройства. Полученный профиль разрезают на части определенной длины.

Существует два способа пропитки армирующих материалов при пултрузии: пропитка сухих волокон в ванночке с последующим формованием профиля в матрице и предварительное формование профиля сухими волокнами с последующей пропиткой непосредственно в формирующей фильере. Второй способ предпочтительнее при пултрузии пустотелых деталей типа трубы.

В пултрузионных установках применяют три способа отверждения заготовок: в туннельных термокамерах внешним нагревателем; в формирующей фильере и в электромагнитном поле СВЧ. Производительность процесса пултрузии определяется в основном отверждением связующего, в зависимости от его химической природы и толщины детали, и составляет от 0,6 до 1,5 м/мин.

При отверждении внешним нагревом требуется прерывать движение заготовки. Наиболее эффективным является третий способ, при котором полное отверждение связующего происходит при непрерывном движении материала в калибрующей фильере длиной около 500 мм. Материал калибрующей фильеры должен быть прозрачен для этого вида излучения. Фирма «Боинг», например, использует в этом случае окись алюминия.

Для пултрузии характерны:

- высокая точность получаемых деталей;
- изготовление деталей любой длины;
- высокое значение коэффициента использования материала (до 95 %);
- большая производительность (до 1,5 м/мин);
- высокая целостность и постоянство характеристик по длине изделия.

В качестве связующего чаще всего применяются термореактивные смолы с коротким по времени периодом жизни и относительно низкой температурой полимеризации.

Особенности технологии пултрузии применительно к композиционным материалам с термопластичной матрицей: более высокая по сравнению с реактопластами температура калибрующей фильеры, равная температуре плавления матричных волокон исходного волокнистого полуфабриката; пропитка наполнителя непосредственно в фильере в момент формования и монолитизация материала профиля; охлаждение полученного профиля в той же фильере перед выходом его из формирующего канала до температуры стеклования матрицы.

Формующая зона фильеры (или зона пропитки) имеет сужающийся канал, переходящий от формы и размеров канала входной зоны к форме и размерам сечения изготавливаемого профиля.

Важной величиной, характеризующей формирующую зону, является угол конусности (оптимальная конусность $5...10^\circ$). Правильно выбранный угол конусности обеспечивает качественную равномерную пропитку волокон наполнителя по толщине сечения, способствует более полному удалению воздушных включений из формирующей зоны во входную зону.

Входная зона фильеры имеет радиусный вход, для исключения повреждения поступающего материала, и поперечное сечение, соответствующее толщине исходного волокнистого пакета, уплотненного в

холодном состоянии. Зона охлаждения, или калибровки, имеет постоянное сечение по длине канала, причем на выходе из канала учитывается усадка материала профиля за счет его охлаждения. Так как в зоне охлаждения идут процессы стеклования и кристаллизации, в конструкции зоны предусмотрен узел принудительного охлаждения с заданной скоростью.

Особенность процесса пултрузии из ПКМ с термопластичной матрицей – это возможность многократной переформовки изделий. С этой целью на выходе из пултрузера можно установить узлы штамповки, гибки, развальцовки и других элементов, производительность которых сравнима со скоростью пултрузии. В этих случаях пултрузируемый профиль будет заготовкой для формования изделий конечной длины и размеров.

2.3.6. НАМОТКА

Намотка – технологический процесс, при котором непрерывный армирующий наполнитель в виде нитей, лент, тканей подается на оправку, имеющую конфигурацию внутренней поверхности изделия, и укладывается по ее поверхности в заданном направлении. После получения необходимой схемы армирования, заданной толщины и структуры материала производится отверждение изделия и удаление оправки.

Такой метод расположения анизотропного материала в конструкции обеспечивает получение максимальной прочности при минимальном весе, что достигается ориентацией армирующего материала в направлении действия главных напряжений.

Эффективность применения метода намотки интересно рассмотреть на примере сравнения равнопрочных конструкций емкостей, работающих под давлением. При одном и том же объеме емкости и расчетном давлении в 64 МПа сварной сосуд из титанового сплава весит 18,3 кг, эпоксидного стеклопластика – 12 кг, боропластика – 9,45 кг.

Для намотки пригоден практически любой непрерывный армирующий материал. На практике чаще всего используется стекловолокно. Для наиболее ответственных изделий, особенно в космической технике, используются борные, угольные и полиимидные волокна. Методом намотки изготавливаются изделия, имеющие форму тел вращения или близкую к ним: баки (рис. 23), корпуса ракетных двигателей; головные части, отсеки ракет; корпуса подводных аппаратов, стволы орудий, корпуса снарядов, трубопроводные магистрали, трансмиссионные

валы вертолетов, коробчатые шпангоуты, воздухозаборники самолетов, лопасти винтов и т. д.



Рис. 23. Конструкция баллона высокого давления, изготовленного намоткой

Намотка может выполняться по сухому, мокрому и совмещенному методу (рис. 24). При сухой намотке используются препреги, что позволяет повысить скорость намотки, культуру производства и получить стабильные характеристики изделия. Перед укладкой препреги проходят через нагревательную камеру и в различном виде укладываются на оправку. При мокром методе исходный армирующий материал пропитывается непосредственно перед укладкой на оправку. Достоинство мокрого метода заключается в меньшем контактном давлении на поверхность изделия, что требует меньшей мощности оборудования, поэтому такой метод применяется для изготовления крупногабаритных оболочек со сложной конфигурацией. При этом ограничителем скорости намотки служит скорость пропитывающего устройства и не позволяет использовать связующие с высокой вязкостью. Кроме того, намоточный тракт загрязняется остатками связующего. При совмещенном методе производится намотка сухого армирующего материала с одновременным напылением связующего или последующей пропиткой под давлением.

Конструкции, предназначенные для изготовления намоткой, должны удовлетворять определенным требованиям:

- форма изделия должна позволять создание натяжения армирующего материала. Формы обратной (отрицательной) кривизны трудно изготавливать намоткой – требуется усложнение техпроцесса и оборудования, однако они не позволяют достичь оптимальных прочностных свойств;

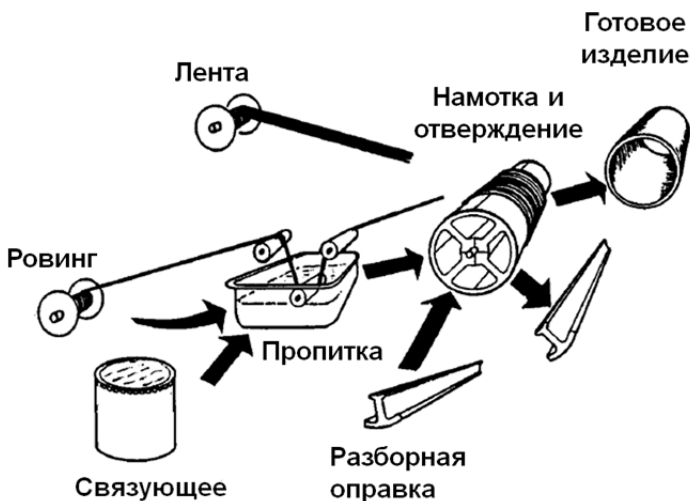


Рис. 24. Схема намотки изделий

- конструкция изделия должна позволять применение технологической (удаляемой) или конструктивной (остающейся в изделии как его элемент) оправки;

- при конструировании намотанных оболочек желательно избегать отверстий в них, если же они необходимы, то следует: избегать перерезания профилей шпангоутов и стрингеров, отверстия располагать между ними; при оформлении отверстия, если это позволяет конструкция, им надо придавать форму ромба (геометрия ромба определяется углом намотки нити, в этом случае перерезается минимальное количество волокон); края круглых отверстий необходимо усилить окантовкой из пропитанной ткани;

- для увеличения прочности конструкции допускается применять фольгу толщиной 0,02...0,05 мм из коррозионностойкой стали и титановых сплавов. Слои фольги укладываются между слоями препрега. Поверхность фольги перед укладкой покрывается слоем связующего.

В зависимости от типа укладки армирующего материала в намотанном изделии различают несколько технологических схем намотки (рис. 25).

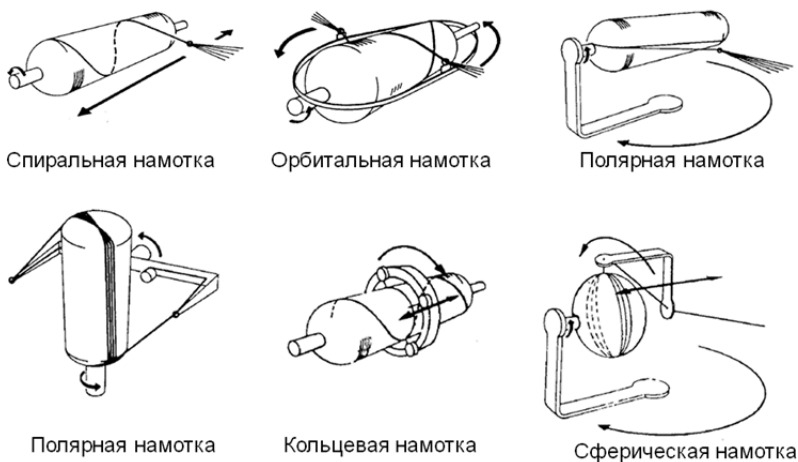


Рис. 25. Виды намоток волокон

При спиральной (или геодезической намотке) оправка вращается, а катушка с лентой движется возвратно-поступательно. Соотношение скоростей вращения оправки и поступательного движения катушки определяет угол намотки ϕ . Этот метод широко используется в сочетании с другими методами – спирально-перекрестной, продольно-поперечной и др.

Спирально-перекрестная намотка – при этом методе намотки лента армирующего материала укладывается на оправку с подачей, превышающей ширину ленты в целое число раз. За прямой и обратный ход раскладывающего устройства формируется один спирально-перекрестный виток, закрывающий часть поверхности оправки. Процесс ведут до тех пор, пока не будет закрыта вся поверхность оправки и сформирован полный двойной слой. Для получения заданной толщины стенки формируемого изделия проводят намотку нескольких таких слоев.

Меняя угол намотки, можно получить различное распределение нагрузок в продольном и окружном направлении, т. е. распределяя армирующий материал вдоль направления действия главных напряжений, можно максимально использовать прочность армирующего материала. Этот метод наиболее широко распространен, его используют для изготовления изделий, имеющих форму тел вращения с произвольной образующей, цилиндров, конусов, сфер, баллонов давления и т. п.

Продольно-поперечная намотка – эта схема намотки реализуется следующим образом: устройство, в котором размещены шпули с лентами, вращается синхронно с вращением оправки, одновременно перемещаясь вдоль ее оси и укладывая продольные ленты. Ширину этих лент и их количество подбирают таким образом, чтобы чулком закрыть всю цилиндрическую поверхность оправки.

Одновременно с раскладчика спирально-винтовой намотки укладываются кольцевые слои лент, фиксирующие ленты продольной укладки. Бобины с материалом для спиральной намотки движутся синхронно с устройством для продольной намотки параллельно оси оправки.

Метод косослойной продольно-поперечной намотки заключается в укладке с малым шагом широкой псевдоленты, образованной из продольных прядей и нитей поперечного армирования. За один оборот получается слой необходимой толщины.

2.3.7. ТЕТРАНАМОТКА

Тетранамотка – метод намотки изделий, имеющих цилиндрическую или коническую форму и подвергающихся действию интенсивных сжимающих и изгибающих нагрузок, при которых существенную роль играют изгибная жесткость элементов структуры оболочки и их прочность при сжатии (рис. 26).



Рис. 26. Пример изделия, выполненного тетранамоткой

Одним из вариантов, позволяющих повысить изгибную жесткость структуры при сохранении жесткостных и прочностных свойств в плоскости укладки нитей, является сетчатая оболочка, состоящая из семейства ребер, образованных тетранамоткой и уложенных под углами $\pm\beta$ к образующей цилиндрической оболочки, армированной в кольцевом направлении.

Метод непрерывной тетранамотки имеет короткий цикл изготовления и высокий коэффициент использования материала ($\sim 95\%$).

Металлическая оправка для намотки состоит из корпуса с поверхностным удаляемым слоем из резины на основе силикоанового каучука, имеющей высокий коэффициент линейного температурного расширения (КТМ), и технологических штырей на торцевой части корпуса в местах изменения направления укладки (рис. 27). В резиновом слое предварительно вырезаются канавки, в которые при намотке укладывается армирующая лента. Углы укладки, количество ячеек, геометрию ячеек, высоту ребер жесткости предварительно рассчитывают.

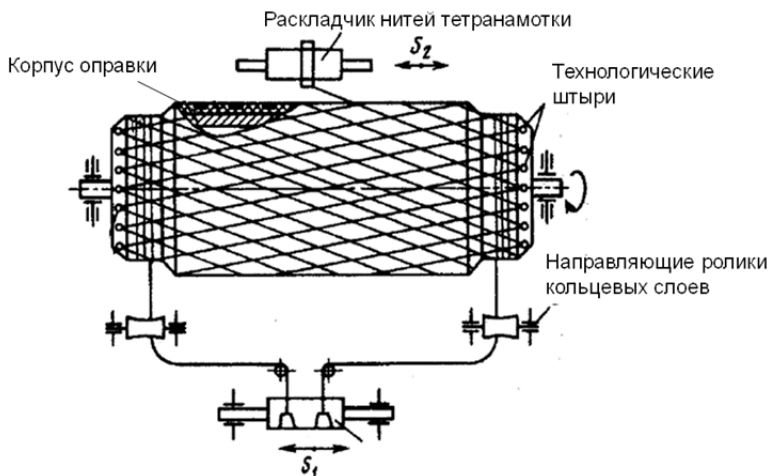


Рис. 27. Схема процесса тетранамотки

После заполнения канавки материалом на глубину, равную высоте ребер, намотку прекращают и выполняют кольцевую подмотку в районе технологических штырей. Несущую оболочку наматывают непосредственно на сетчатую оболочку обычным способом. После окончания намотки изделие отверждают, затем на токарном станке обрезают

технологический припуск по краям оправки, снимают с оправки и удаляют резиновый мешок.

Конструкция сетчатой структуры, изготовленная намоткой, может обладать такой жесткостью и прочностью при сжатии, что ее можно использовать без дублирующей сплошной оболочки. Примером может служить изготовление адаптера разгонного блока «Бриз-М» (адаптер предназначен для установки на него выводимого космического аппарата (КА)). Сетчатый углепластиковый адаптер был спроектирован для выведения КА массой 7 т. Диаметр адаптера по стыку с разгонным блоком «Бриз-М» – 2490 мм, по стыку с КА – 1194 мм, высота – 1000 мм. При собственной массе сетчатой углепластиковой конструкции 45 кг адаптер способен выдерживать осевую сжимающую нагрузку более 1500 кН, осевая жесткость при этом превышает 300 кН/мм. Такой адаптер использовался при выведении девяти зарубежных КА, в том числе тяжелого КА «Интелсат-02» массой 5600 кг.

Кроме адаптера были спроектированы, изготовлены и испытаны приборный и хвостовой отсеки II ступени ракетносителя «Протон-М» сетчатой конструкции из углепластика. Изготовление было выполнено методом намотки. Суммарный выигрыш в массе II ступени за счет этих отсеков составил 450 кг.

Создание давления при отверждении связующего, обеспечивающего монолитизацию материала, повышение физико-механических показателей, кроме автоклава, можно производить следующими способами:

- вакуумное формование эластичной оболочкой (когда нельзя применять автоклавы из-за большого габарита изделия);
- формование под действием теплового расширения: на намотанные слои ПКМ наматывается несколько слоев резины с большим КТР, например силиконовой, затем все помещается в металлическую жесткую форму, а далее – в термошкаф. При повышении температуры резиновая масса расширяется сильнее металла и создает давление на отверждающийся материал (давление может достигать 5 МПа);
- формование с помощью термоусаживающейся ленты. Тканые ленты из кремнеземных нитей обладают способностью усаживаться на 5...7 % при нагревании до 500...700 К. Если у такой ленты, намотанной на ПКМ на оправке, отсутствует возможность проскальзывания, то при усадке создается достаточное для отверждения связующего давление;
- отверждение связующего в печах (наиболее распространенный способ) обладает рядом технических недостатков: длительный процесс

разогрева и выдержки при расчетных температурах, для изделий больших габаритов отсутствуют соответствующие печи, при отверждении толстостенных изделий трудно обеспечить одновременный равномерный разогрев связующего по всей толщине изделия;

- один из перспективных методов – нагрев в поле СВЧ (диэлектрический нагрев) – позволяет обеспечить равномерный прогрев по толщине изделия.

Во всех случаях изготовления изделий намоткой применяют специальную технологическую оснастку – оправку. Конструкция оправки должна отвечать следующим требованиям:

- соответствовать геометрии и форме внутренней конфигурации изделия;

- обладать достаточной прочностью при сжимающих нагрузках;
- не прогибаться под собственной массой;
- не проскальзывать на валу;
- легко удаляться после отверждения изделий;
- предусматривать установку закладных изделий;
- иметь гладкую и ровную поверхность.

В зависимости от конфигурации изделия и серийности производства оправки могут различаться по конструкции на цельные, разборные и разрушаемые.

Цельные оправки применяют в серийном производстве при формировании изделий, из которых оправку можно извлечь полностью (цилиндры, конусы, полусферы) (рис. 28). Извлечение изделия в этом случае не представляет трудности, если на поверхность оправки перед намоткой было нанесено антиадгезионное покрытие. Для обеспечения демонтажа поверхность цилиндрических оправок выполняют с небольшой конусностью. Материалом для оправок этого типа служат алюминиевые сплавы и стали.

Разборные оправки целесообразно использовать при изготовлении не менее 25 изделий диаметром от 500 до 1500 мм такой конфигурации, которая не позволяет извлечь из них цельную оправку.

Разборные неразрушаемые металлические оправки представляют собой ряд отдельных секций, собранных на продольной оси – основании с использованием регулируемых стоек-расчалок. Разборка оправки и снятие отдельных секций обеспечивает простой демонтаж намотанной детали, а последующая их сборка – быструю подготовку к намотке следующих деталей.

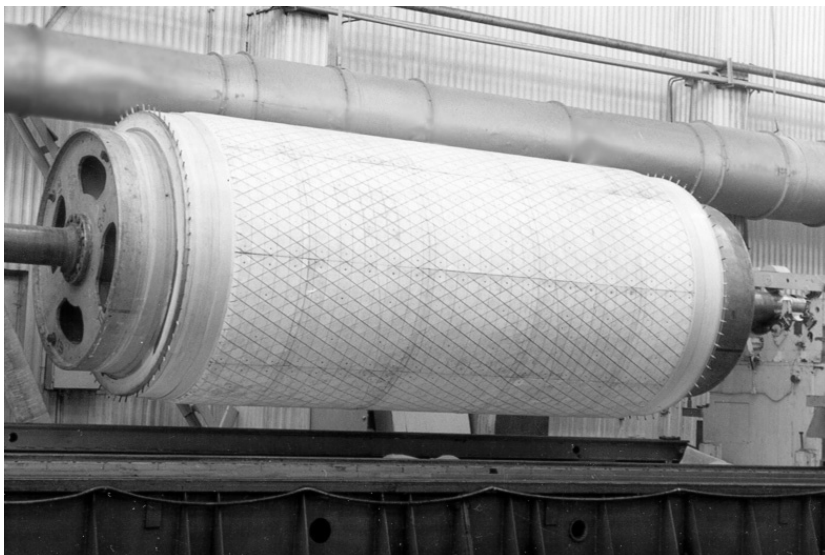


Рис. 28. Оправка для тетранамотки

Разрушаемые оправки используются в единичном и мелкосерийном производстве для разовой намотки изделия. Материалы для их изготовления: гипс, смесь песка с водным раствором поливинилового спирта, пескоклеевая масса, низкоплавкие сплавы. Такие оправки получают методом литья или прессования в специальных пресс-формах. Их главный недостаток – неравномерная усадка, которая приводит к нарушению точности наматываемых изделий. Удаляются такие оправки механическим разрушением, вымыванием, выплавлением, растворением в соответствующих жидкостях.

К специальному виду оправок можно отнести пневмооправки, применяемые для намотки деталей со сферической поверхностью диаметром до 500 мм. Они представляют собой резиновую оболочку, в которой создается повышенное давление. Для демонтажа давление стравливается и оболочка вынимается через горловину. В процессе термостатирования детали, намотанной на такую оправку, можно, повышая давление, получать дополнительную силу прессования.

С помощью метода плетения, аналогичного тетранамотке, можно получать не только цилиндрические и конические силовые конструкции, но и плоские рамы, а также подкрепленные монолитные

панели. В этом случае оснастка представляет собой либо набор шпилек, либо оснастку с профилированными канавками, куда укладываются жгуты.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что входит в подготовку производства изделий из КМ?
2. Как формируется типовой пакет КМ?
3. Какие материалы применяются при изготовлении оснастки?
4. Какие этапы проходит пакет при отверждении связующего в автоклаве?
5. В чем отличие обычной намотки от тетрамотки?

3. ОБРАБОТКА И СБОРКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

Точное изготовление деталей из ПКМ невозможно из-за разности коэффициентов линейного термического напряжения композита и оснастки, усадки связующего и т. д. Для сборки изделий с деталями из ПКМ необходима их обработка, заключающаяся в обрезке припусков и сверлении отверстий. По ряду причин использование лазерной и гидроструйной резки ограничено, поэтому все операции по окончательной доводке за редким исключением выполняются исключительно механическим способом. Обработка ПКМ резанием имеет ряд особенностей, отличающих их от аналогичной обработки металлов (рис. 29):

- ярко выраженная анизотропия свойств. Вследствие этого на качество получаемой поверхности существенно влияет схема армирования волокнистых ПКМ. Поэтому при разработке технологической операции следует учитывать направление обработки относительно направления армирования;
- относительная сложность получения высокого качества поверхности, так как слоистая структура и относительно низкая связь матрицы с наполнителем приводят к расслоению и скалыванию. При перекрестном армировании перерезание волокон ведет к разлохмачиванию;
- низкая теплопроводность ПКМ обуславливает слабый отвод теплоты в обрабатываемое изделие, поэтому основная доля теплоты (90 %) отводится в инструмент (при обработке металлов до 90 % теплоты отводится стружкой), что способствует быстрому его износу;
- деструкция полимерного связующего при механообработке за счет действия больших локальных напряжений и высокой температуры в зоне резания, превышающей температуру деструкции полимера;
- абразивное воздействие наполнителя, обладающего высокой твердостью и абразивностью, интенсифицирует износ инструмента;

- высокие упругие свойства ПКМ обуславливают наличие слоя сжатия обрабатываемого материала, находящегося ниже линии среза, что приводит к упругому его восстановлению, а это вызывает интенсивный износ инструмента по задней поверхности;
- особые условия по технике безопасности, связанные с образованием мельчайшей пыли, заряженной статическим электричеством;
- в большинстве случаев невозможность применения СОЖ, так как большинство ПКМ гидрофобно, обладает высоким влагопоглощением из-за изменения физико-механических свойств материала.

Перечисленные выше особенности обработки накладывают специфические требования на режущий инструмент и режимы обработки. При обработке происходит также перерезание волокон арматуры, что снижает механические свойства композита. Кроме того, механическая обработка активизирует водопоглощение, поэтому обработанные участки необходимо покрывать грунтовкой.

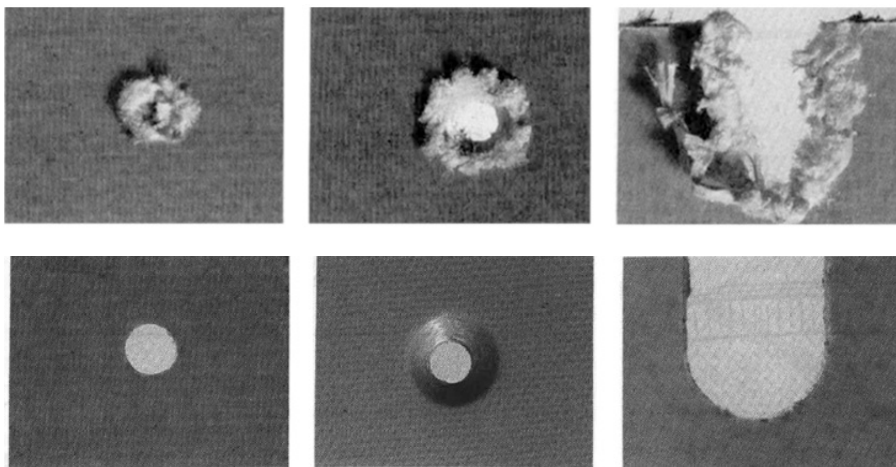


Рис. 29. Сравнение отверстия в ПКМ, сделанного обычным сверлом по металлу (вверху) и инструментом, предназначенным для обработки ПКМ (внизу)

Для зачистки углов, кромок, окон деталей из угле-, стекло-, органико-, боропластиков применяются алмазные зачистные головки. Зачистка производится ручным (пневматическим) механизированным инструментом или на универсальных зачистных станках.

3.1. ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ

3.1.1. РЕЗКА ОТРЕЗНЫМИ КРУГАМИ

В условиях агрегатно-сборочного цеха с помощью пневматических и электрических средств механизации стекло-, угле- и органоластики можно отрезать отрезными кругами на полимерных связках (карборунд на бакелитовых связках) (табл. 9). Алмазные круги на металлических связках используются как на стационарном оборудовании, так и в условиях агрегатно-сборочного цеха с применением ручного механизированного инструмента. Отрезные круги на металлических связках предназначены для высокоскоростной обработки углепластиков толщиной до 20 мм, стеклопластиков толщиной до 8...10 мм, органопластиков – до 25...30 мм и боропластиков – до 6 мм.

Таблица 9

Режимы резания ПКМ отрезными кругами

Наименование материала	Круги на полимерной связке					Круги на металлической связке				
	Скорость резания, м/с	Продольная подача, м/мин	Продольная подача при большой толщине, м/мин	Линейная точность, мм	Длина до полного износа инструмента при $S = 3$ мм, м	Скорость резания, м/с	Продольная подача, м/мин	Продольная подача при большой толщине, м/мин	Линейная точность, мм	Длина до полного износа инструмента при $S = 3$ мм, м
Углепластик	30...50	0,8...2,0	0,8...1,5	0,5	25...50	50...100	1,5...5,0	1,5...2,0	0,5	15...20
Органопластик	30...50	0,5...2,0	0,5...0,6	0,5	15...25	50...100	0,5...2,5	0,8...0,6	0,5	12...15
Стеклопластик	–	–	–	–	–	50...100	0,5...5	–	0,2...0,5	8...15
Боропластик	–	–	–	–	–	–	–	–	0,2	1,5...2,0

В обоих случаях шероховатость обработанной поверхности R_z приблизительно равна 20...40 мкм, дефекты кромок (разлохмачивание) – приблизительно 0,2...0,4 мм. Разрезание выполняется по разметке. Разметка производится мягким карандашом, повреждение поверхности не допускается. Угле-, органо- и стеклопластики разрезаются без применения смазочно-охлаждающих жидкостей. При резке бопластика инструмент охлаждается в 5 %-м растворе соды в воде.

3.1.2. РЕЗКА НОЖОВЧНЫМИ ПОЛОТНАМИ

Ножовочные полотна предназначены для резки угле-, стекло-, органо-пластиков (табл. 10). Ножовочные полотна могут изготавливаться с износостойкими покрытиями и без них и применяться для обработки ПКМ ручными пневматическими машинами или пневматическими напильниками. Шероховатость обработанной поверхности R_z приблизительно равна 10...20 мкм, дефекты кромок – приблизительно 0,2...0,25 мм. Линейная точность – около 0,3...0,5 мм.

Т а б л и ц а 10

Режимы резания ПКМ ножовочными полотнами

Наименование материала	Режимы резания		
	Число двойных ходов	Продольная подача, м/мин	Длина до полного износа инструмента при $S = 5$ мм, м
Углепластик	1100...1500	0,6...0,8	25...30
Стеклопластик	1100...1500	0,3...0,5	15...20
Органопластик	1100...1500	0,8...1,0	25...30

3.1.3. СВЕРЛЕНИЕ

Сверление – одна из наиболее часто встречающихся и наиболее трудоемких операций механической обработки. Требования к точности при сверлении относительно невелики и не превышают обычно 11, 12 квалитет: параметр шероховатости поверхности должен соответствовать $R_z \geq 20$ мкм.

Для сверления стекло-, органо-, углепластиков применяют сверла из твердых сплавов ВК-8, ВК-9; они предназначены для сверления ручными

пневматическими машинками. Геометрия этих сверл отлична от геометрии сверл для сверления металлов. Для сверления боропластиков эти сверла непригодны, требуется инструмент из более твердых материалов, например, кольцевые и трубчатые сверла с алмазонасным слоем. Алмазные абразивные сверла состоят из двух частей алмазонасного слоя и металлической оправки, на которую этот слой нанесен. Алмазонасный слой характеризуется маркой, зернистостью алмазного порошка, природой связки. В качестве связки рекомендуется использовать никель.

Сверление отверстий производится острозаточенным инструментом по кондукторам, шаблонам, например, отверстиям в металлических деталях, разметке.

При сверлении смешанного пакета со стороны ПКМ (табл. 11) металлическая стружка выкрашивает и разбивает отверстие в ПКМ на глубину 0,2...0,8 мм. При сверлении со стороны металла на входе сверла в ПКМ происходит разрушение его заусенцами металла, на выходе – расслоение и скалывание ПКМ. Поэтому при сверлении отверстий в смешанных пакетах типа ПКМ + металл необходимо располагать ПКМ между плотно сжатыми металлическими деталями, одной из которых может быть элемент пакета, а другой – шаблон, кондуктор или специальная накладка.

При сверлении двух слоев ПКМ технология получения отверстий в меньшей степени влияет на прочностные характеристики, так как число дефектов ПКМ существенно снижается из-за отсутствия металла. Чтобы исключить сколы и вспучивания на входе и выходе сверла из отверстия, устанавливают технологические прокладки и накладки из текстолита, фанеры, прочно скрепляют с пакетом ПКМ и просверливают совместно. Для сверления пакетов ПКМ используется инструмент со специальной заточкой.

Таблица 11

Режимы резания при сверлении ПКМ

Материал	Скорость, V , м/мин	Подача, S , мм/об
Органопластик СВМ	90...120	0,06...0,4
Боропластик	22	0,03...0,3
КМУ-8	50...80	0,03...0,08
Стеклопластик	30...70	0,03...0,3

Следует избегать сверления вдоль слоев материала, так как это приводит к его расслоению, если все-таки есть необходимость, нужно полностью зажать деталь.

Образующиеся при сверлении и зенковании ПКМ пыль и стружку необходимо удалять из рабочей зоны промышленными пылесосами или с помощью специальных насадок и сверлильной ручной машины. ПКМ обычно сверлят без применения СОЖ.

3.1.4. ТОКАРНАЯ ОБРАБОТКА

ПКМ можно обтачивать, растачивать, торцевать на обычных универсальных токарных станках. Требования точности при токарной обработке ПКМ невысоки – 11, 12 квалитеты, параметр шероховатости $Rz \geq 20$ мкм, поэтому обычно припуск снимают за один проход. Чистовую обработку со снятием припуска ~ 1 мм применяют редко.

Наиболее рациональный материал для обработки стекло-, угле-, органопластиков – это однокарбидные твердые сплавы.

Температура в зоне реза не должна превышать ~ 300 °С. Поэтому инструментальный материал должен иметь высокую теплопроводность. Теплопроводность однокарбидных сплавов в 1,6...2,6 раза выше, чем двухкарбидных при одинаковой твердости.

Поэтому рекомендуется изготавливать инструмент из сплавов ВК-2, ВК-4, ВК-8, ВКЗМ. При увеличении процентного содержания кобальта снижается износостойкость. Означенные сплавы оптимальны и с этой точки зрения. Так как ПКМ обладают высокой упругостью по сравнению с металлами и при резании имеют большой контакт с материалом по задней поверхности инструмента, то оптимальные значения задних углов инструмента немного больше, чем при обработке металла.

Высокая твердость боропластиков соизмерима с твердостью искусственных алмазов и материала «Эльбор-Р», поэтому они обрабатываются только алмазным инструментом.

3.1.5. ФРЕЗЕРОВАНИЕ

Слоистые пластики можно фрезеровать на обычных станках. Материалы для изготовления фрез те же, что и для резцов. Скорость резания лежит в пределах 180...300 м/мин при подаче 0,05...0,15 мм/об. Низкие скорости резания и подачи в этих диапазонах принимают для

фрез из быстрорезов, высокие – для твердосплавов и алмазных фрез. Глубина резания не должна быть более 0,25 мм за проход. Для охлаждения предпочтительно использовать сжатый воздух.

3.1.6. РЕЗКА С ПОМОЩЬЮ ВОДЯНОЙ СТРУИ

В отечественной промышленности и за рубежом для разрезания ПКМ применяются установки с использованием в качестве режущего инструмента водяной струи. Эти установки представляют собой агрегат, подающий на заготовку струю воды под высоким давлением. Они могут быть использованы в комплексе с однокоординатным или многокоординатным станком, управляемым ЧПУ.

При таких высоких давлениях водяная струя диаметром 0,1...0,3 мм имеет жесткость и твердость, присущие искусственному сапфиру, и способна резать ПКМ толщиной до 25 мм. Операция выполняется без пыли и шума, материал остается сухим. Недостатки способа – высокий уровень шума и необходимость тщательной фильтрации воды.

Метод хорошо применим для арамидных органопластиков, хуже всего – для борозпоксидов, для остальных композитов применение этого метода ограничено.

3.2. СБОРКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

Сборка изделий из ПКМ, применяющихся в авиастроении, имеет те же принципы, что и сборка обычных металлических изделий. Особенности составляют только методы соединения деталей, так как в силу малой твердости композиционных изделий чаще применяется склеивание, чем болтовые и клепальные соединения.

Исходя из специфики композиционных изделий сборка может быть разделена на три типа процессов (рис. 30):

- сборка изделия из готовых отвержденных деталей;
- сборка из полуфабрикатов, не прошедших окончательное отверждение;
- комбинированная сборка, где наряду с отвержденными деталями присутствуют неотвержденные полуфабрикаты.

Можно рассмотреть эти процессы на примере сборки условного стабилизатора.

При соединении отвержденных деталей принципиальных отличий от сборки конструкции из металлических деталей не будет, за исключением особенности выполнения соединений композиционных материалов. В таком случае детали, имеющие внутренние подкрепления, устанавливаются по базирующим элементам и соединяются между собой. Аналогичным способом соединяются композитные детали с металлическими.

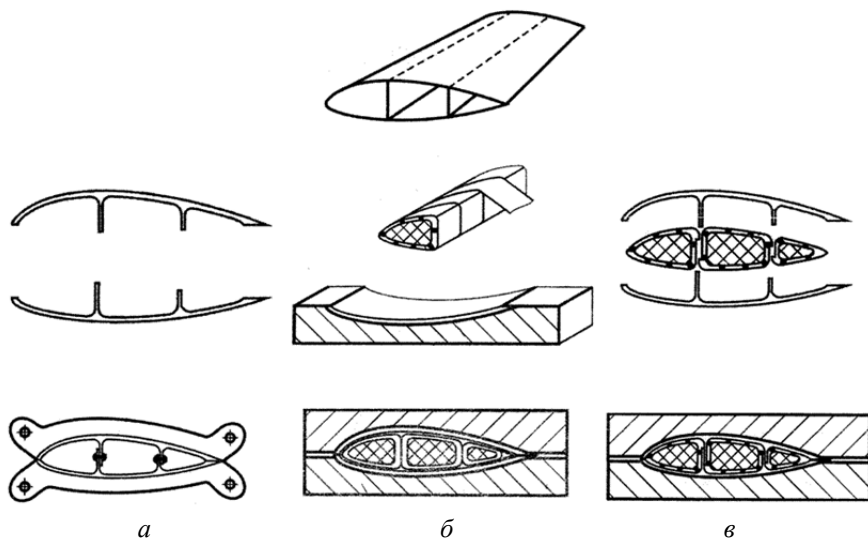


Рис. 30. Виды сборки изделий из ПКМ:

а – сборка изделия из готовых отвержденных деталей; *б* – сборка из полуфабрикатов;
в – комбинированная сборка

В случае соединения неотвержденных деталей процесс соединения выполняется по следующей схеме:

- 1) технологические вкладыши оборачиваются препрегом;
- 2) в формы укладывается препрег обшивки;
- 3) вкладыши собираются совместно в единый блок.

Дальнейшее формование производится при повышенном давлении и температуре. Вкладыши создают давление изнутри: они либо изготавливаются из терморасширяющегося материала, либо расширяются под давлением подаваемого воздуха. После полимеризации образуется

монолитная конструкция без соединительных швов. Этот метод называется соотверждением.

Если соединяются неотвержденные детали с уже отформованными, в данном примере отформованные обшивки устанавливаются в оснастку вместе с препрегом, нанесенным на технологические вкладыши. Препрег за счет адгезии соединяет верхнюю и нижнюю часть обшивки. Этот метод называется вторичным склеиванием.

Стоит отметить, что соединения последних двух типов выполняются преимущественно с использованием жертвенного слоя. На поверхность неотвержденного препрега в месте будущей склейки укладывается термостойкая ткань с высокими антиадгезионными свойствами. После формования эта ткань остается на поверхности отформованной детали и удаляется непосредственно перед укладкой неотвержденного препрега. Таким образом, образуется чистая поверхность с необходимой шероховатостью без дополнительных операций типа зачистки, обезжиривания и т. д.

Так как соединение – наиболее слабое место композиционных изделий, их стараются проектировать с минимальным количеством деталей и соединений, например, панели крыла изготавливаются сразу с элементами подкрепления или воздуховоды сложной формы, являющиеся единым целым.

3.2.1. МЕХАНИЧЕСКОЕ СОЕДИНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ

Болтовые и заклепочные соединения являются основными видами соединений, применяемых в авиации (рис. 31). Механизмы разрушения соединений композитов применяемых в авиастроении, сходны с металлами, но имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать:

- хрупкость материала, которая выражается в концентрации напряжений на границах отверстий;
- на механизм разрежения влияют количество и ориентация слоев, содержание армирующего материала, пористости и т. д.

Когда проектируется подобное соединение, необходимо применять специальные решения, которые учитывают природу композитов. В соединении поведение композитов отличается от металлов, поэтому невозможно разработать универсальный метод соединения для всех видов композитов (табл. 12).

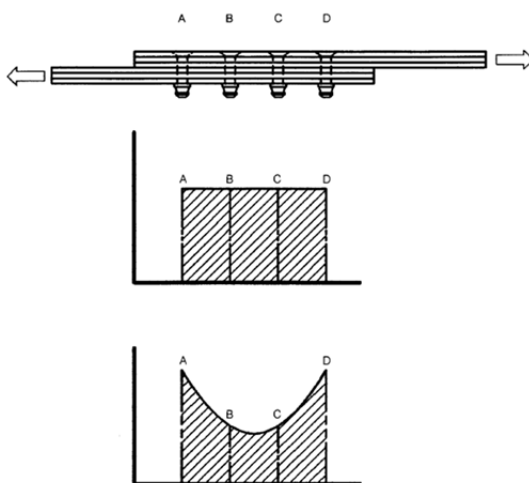


Рис. 31. Особенности нагружения многорядных заклепочных соединений в металлах (в середине) и ПКМ (снизу)

Таблица 12

Достоинства и недостатки клепаных и болтовых соединений

Достоинства	Недостатки
Отработанная технология	Концентратор напряжений
Возможность разборки	Создание отверстий повреждает арматуру композита
Легкость контроля соединения	Малая стойкость композита к смятию
Надежность и долговечность	Склонность к преттинг-износу и коррозии
Соединение происходит по толщине соединения	Возможность появления усталостных трещин в металлических частях

Нагрузка в стержневом соединении передается за счет смятия части поверхности отверстия, поэтому для повышения прочности соединения необходимо распределять нагрузку. Часть нагрузки перераспределяется за счет сил трения на поверхностях, создаваемых осевым натягом стержневого элемента, это напряжение со временем ослабевает из-за релаксационных процессов, проходящих в композитах (рис. 32).

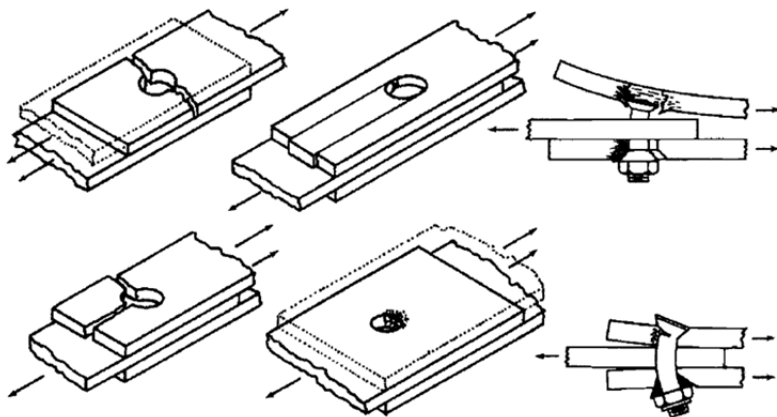


Рис. 32. Виды разрушения клепаных соединений в ПКМ

Во избежание «выдергивания» однонаправленной арматуры в зоне соединения создают квазиизотропические условия, укладывая слои с ориентацией 0° , $\pm 45^\circ$ и 90° либо применяя другие способы усиления. Из-за особенностей поведения композитов под нагрузкой для усиления соединения применение более двух рядов неэффективно.

Особенности клепки деталей из ПКМ и конструктивных особенностей заклепок (рис. 33):

- уменьшение усилия раздачи заклепки и контактного усилия со стороны заклепки на материал отверстия;
- увеличение площади контакта заклепки с поверхностью соединяемых деталей как по отверстию, так и под головками заклепок;
- снижение усилия формообразования элементов заклепки.

В настоящее время существует множество видов заклепок, процесс клепки аналогичен клепке металлических изделий.

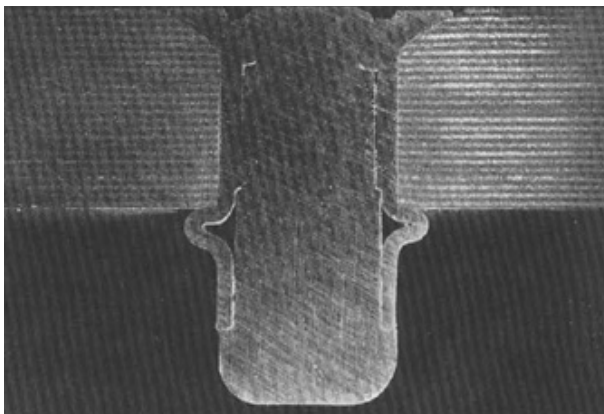


Рис. 33. Заклепка, предназначенная для клепки ПКМ

В болтовых соединениях возникают те же проблемы, что и в клепальных соединениях, кроме того, для повышения ресурса болтового соединения устанавливают болты с увеличенным радиальным натягом и введением металлических закладных элементов.

Прочность клеевых соединений зависит от площади контакта, но имеет ряд ограничений (табл. 13). При соотверждении сотовых конструкций возможно появление контуров сот на поверхности детали, что приводит к снижению механических характеристик.

Таблица 13

Достоинства и недостатки клепаных и болтовых соединений

Достоинства	Недостатки
Малая концентрация напряжений	Ограничение по толщине соединяемого пакета
Высокое сопротивление усталости	Сложность с контролем изделия
Герметичное соединение (защита от коррозии)	Падение прочности соединения со временем
Нет преттинг-износа	Неразборное соединение
Гладкая внешняя поверхность	Остаточные напряжения
Малый вес соединительного элемента	Требует специальной оснастки

Несмотря на то что большинство соединений рассчитывается на передачу касательных напряжений, чаще всего они работают на отрыв слоя из-за эксцентрисичности нагрузки (рис. 34 и 35). Композиционные материалы, а также арматура плохо воспринимают нагрузку в направлении, перпендикулярном плоскости армирующего материала, поэтому чрезвычайно важно проектировать соединение с учетом этих особенностей и избегать возможности появления нежелательных напряжений в соединении.

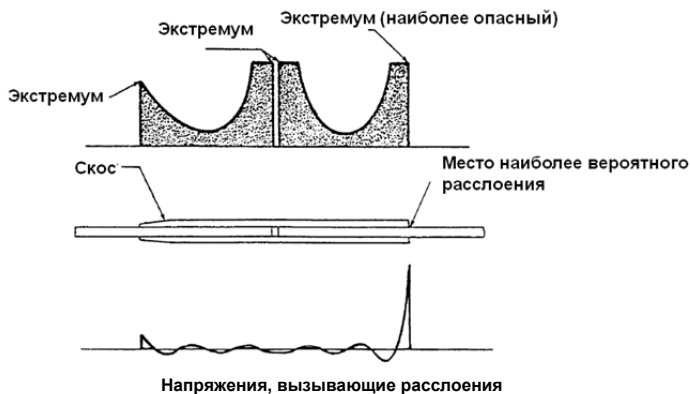


Рис. 34. Особенности нагружения клеевого соединения

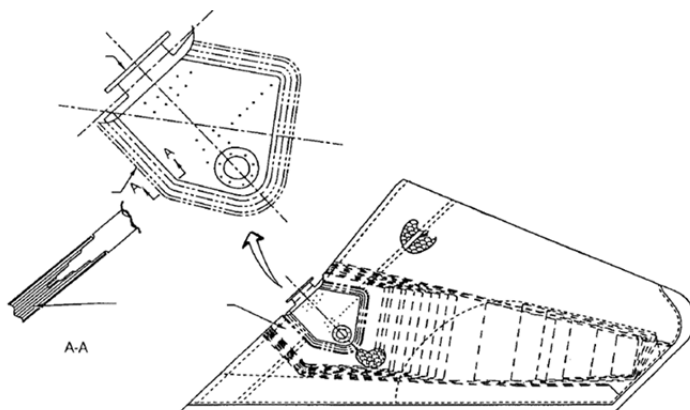


Рис. 35. Пример соединения навесной петли горизонтального оперения с обшивкой из ПКМ

Так как проблема потери прочности клеевого соединения со временем не решена, определенный интерес представляет соединение с помощью термопластичных клеев, которые периодически можно обновлять.

Часто сочетают оба вида соединений – клеевое соединение дополнительно усиливают заклепками.

3.2.2. УСИЛЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Как отмечалось выше, композиты плохо воспринимают нагрузку, приводящую к расслоению, потому что в большинстве являются материалом с двухмерным армированием и отсутствием связей между слоями. Этим ограничивается прочность клеевых соединений, а также стойкость композитов к ударному воздействию. Эти недостатки можно исправить с помощью введения связи между слоями.

Подобными способами являются сшивание слоев и игольчатые соединения. Достоинством подобных методов является возможность локальных упрочнений (разрезы, отверстия, зоны склейки). В первом случае слои сшивают на промышленных швейных машинах, которые могут прошивать пакеты толщиной до 25 мм. Для сшивания используются чаще арамидные волокна, но можно также использовать стеклянные и углеродные волокна. Другая особенность применения прошивки – это локальное упрочнение отдельных участков детали армированием в заданном направлении. Исследования показали, что подобное усиление отверстия в композитной детали позволяет повысить ее сопротивление смятию на 30...50 %.

Игольчатое соединение заключается в образовании связи между слоями с помощью тонких стержней, которыми протыкается пакет. Стержни изготавливаются из титана или углепластика и имеют диаметр порядка 0,25...0,5 мм. Стержни обычно находятся в сжимаемом пеноблоке в заданном порядке. Использование пеноблока позволяет предотвратить потерю устойчивости стержня при введении. Введение производится по двум схемам: либо с помощью давления на пеноблок в процессе отверждения детали, либо с помощью давления ультразвукового осциллятора. Стоит отметить, что с помощью ультразвука можно вводить металлические стержни в отвержденный композит, что дает возможность ремонтировать поврежденные детали и собирать изделия из композитов, причем прочность соединения может быть примерно равна прочности целого композита.

Достоинством рассмотренного способа усиления по сравнению с прошивкой служит то, что при разрушении объекта меньше вероятность образования мелких осколков. Это особенно важно для различного рода лопастей, так как их элементы, обладая большой кинетической энергией, могут нанести значительный вред летательному аппарату. Подобный метод используется также для усиления сэндвичевых панелей. Кроме того, этот метод более технологичен на сложных поверхностях и не требует специального оборудования.

3.3. ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПЕНСИРУЮЩИЕ ЗАПОЛНИТЕЛИ

Особенности технологии авиационного производства обуславливают применение метода неполной (частичной) взаимозаменяемости при выполнении сборочных работ, что, в свою очередь, ведет к необходимости технологической компенсации производственных погрешностей.

Для компенсации производственных погрешностей при сборке летательных аппаратов используют подгоняемые по месту сопряжения технологические прокладки, а также опилование и шабровку специально предусмотренных припусков. Применение этих методов технологической компенсации затруднительно из-за высокой трудоемкости работы, и потому она не всегда бывает удовлетворительной.

Поиски экономичных методов, обеспечивающих требуемую точность и высокое качество выполнения сопряжений деталей и узлов при минимальных трудозатратах, привели к идее использования отверждающихся полимерных композиций. Эти композиции являются универсальными самонастраивающимися компенсаторами неточностей размеров и форм сопрягаемых элементов.

Полимерный компенсирующий наполнитель (ПКЗ) (полимерный композиционный материал (ПКМ) с дисперсным наполнителем) в неотвержденном состоянии вводится в зазор между деталями при сборке, а излишек его выдавливается в процессе фиксации пакета. После отверждения наполнитель выполняет роль прокладки, идеально подогнанной в соответствии с конфигурацией зазора. Таким образом, достигается качественная компенсация погрешностей и одновременно полная ликвидация подгоночных операций.

При сборке элементов конструкций из ПКМ преимущества технологической компенсации с помощью ПКЗ наиболее очевидны и обусловлены особенностями изготовления и сборки деталей (рис. 36). Их невозможно, подобно металлическим, опиливать, править, шабровать, подгоняя по месту. Допустимые зазоры составляют в соответствии с нормативной документацией: в клепаных соединениях – 0,1 мм, в клееклепаных – 0,15 мм. При существующих методах увязки оснастки и точности изготовления деталей из ПКМ требуемая точность сопряжения при сборке не обеспечивается. Практика показывает, что неприлегание отдельных поверхностей достигает 1,5 мм. В этой ситуации ПКЗ просто незаменим.

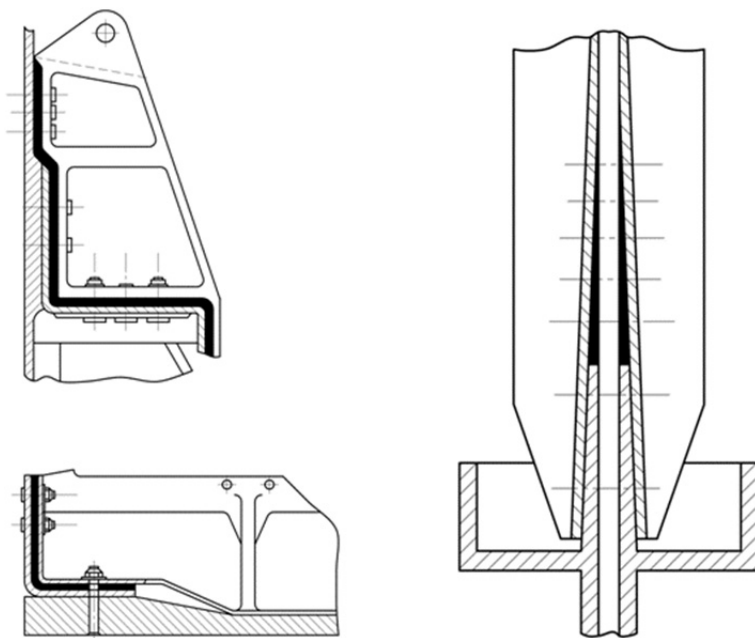


Рис. 36. Примеры использования ПКЗ при сборке

ПКЗ применяется преимущественно в неразъемных в процессе эксплуатации соединениях. При необходимости допускается в неразъемных при эксплуатации соединениях разъемную прослойку заполнителя

выполнять (технологический разъем по поверхности одного из соединяемых элементов) с последующим нанесением полимерной матрицы на отвержденную прослойку ПКЗ при окончательной сборке.

ПКЗ наносится в местах установки прокладок и шабрения деталей. Целесообразно для исключения натягов при сборке предусмотреть в этих местах гарантированный плазовый зазор не менее 0,3 мм на сторону.

Наиболее эффективно применение заполнителя в стыках жестких, толстостенных (более 3 мм) элементов конструкции. При этом обеспечивается идеальная подгонка многоплоскостных, «усовидных» и других стыков со сложной конфигурацией зазора, особенно при постановке различных кронштейнов и фитингов. Заполнитель может быть также применен для выравнивания обводов или стыковых поверхностей путем заполнения зазоров между обшивками и элементами каркаса, за исключением зазоров по стыкам обшивок, люков и створок на внешней поверхности изделия.

Применение ПКЗ целесообразно также в случае, если подгонка затруднена или не обеспечивает требуемой точности. Заполнитель не применяют в тонкостенных неподкрепленных элементах конструкции при суммарной толщине пакета менее 2...2,5 мм. Заполнитель не применяется в соединениях, работающих на сдвиг и отрыв (в вильчатых, фланцевых и др.).

Наименьшая толщина прослойки не регламентируется. Наибольшая определяется конструктором с учетом степени нагруженности соединения и составляет величину 2...3 мм. Причем 2...3 мм допускается в малонагруженных, неответственных соединениях.

Полимерный компенсирующий заполнитель может применяться в болтовых и заклепочных соединениях, выполненных как ударным, так и прессовым методом. Последний более предпочтителен. Без использования крепежа ПКЗ неприменим. Минимальное количество точек крепежа в стыке должно быть не менее трех. Расположение швов крепежа не влияет на применение заполнителей. Они могут использоваться при вертикальном и «потолочном» расположении швов.

Марка заполнителя выбирается из условий его работы в конструкции (например, водостойкий, теплостойкий) и физико-механических характеристик самого заполнителя.

Основные ингредиенты полимерных компенсирующих наполнителей

ПКЗ – это наполненная пластмасса, состоящая из полимерной матрицы и наполнителей. К матрице предъявляются следующие основные требования:

- работоспособность в заданном интервале температур;
- хорошая смачивающая способность и адгезия по отношению к наполнителям;
- хорошая адгезия к алюминиевым, титановым сплавам и сталям;
- минимальная усадка при отверждении;
- низкий коэффициент линейного расширения;
- высокая стойкость к внешним воздействиям;
- способность отверждаться при невысоких температурах;
- жизнеспособность, обеспечивающая нормальный ход технологического процесса.

Наиболее соответствуют этим требованиям эпоксидные смолы холодного отверждения. Они представляют собой растворимые в неотвержденном состоянии вещества, характеризующиеся хорошей адгезией ко многим материалам, небольшой усадкой при отверждении. В процессе отверждения этих смол летучие вещества не выделяются, что определяет сравнительную простоту их переработки. Одним из основных преимуществ эпоксидных полимеров является их способность хорошо работать в условиях стесненной деформации без нарушения сплошности. Эпоксидные смолы стойки к действию влаги, щелочей, солей, окислителей, органических растворителей. При кратковременном контакте материала на базе эпоксидных смол с водой и незначительном водопоглощении (0,37...0,48 %) снижение прочности носит полностью обратимый характер. Эпоксидные смолы способны отверждаться без подвода тепла и при нагревании в присутствии влаги и даже в воде.

Полимерная матрица, кроме смолы, содержит отвердитель, в качестве которого могут быть использованы, например, полиамиды. Иногда эпоксидные композиции могут быть модифицированы каучуком с целью повышения эластичности и снижения хрупкости материала.

В качестве основного наполнителя во всех марках ПКЗ используется ровинг из алюмоборосиликатного стекла марок РБТ и РБН. Бесщелочные алюмоборосиликатные волокна обладают высокой стойкостью к воде и пару высокого давления, органическим и минеральным кислотам, за исключением фтористо-водородной. Недостатком стеклянных волокнистых наполнителей является заметное снижение прочности во влажных средах и резкое снижение адгезии к ним полимеров. С целью защиты поверхности микроволокон комплексные нити ровинга вырабатывают на замасливателе. Вещества, входящие в замасливатель, снижают адгезию смолы к волокну. После удаления (выжигания) замасливателя на поверхности волокна образуется слой влаги, адсорбированный из воздуха, удалить которую очень трудно, так как она связана химическими связями с поверхностью стекла. Поверхностная влага снижает адгезию связующих к стекловолокну и способствует пористости связующего.

Эффективным способом уменьшения адсорбции влаги и повышения адгезии волокон к связующему является аппретирование, которое изменяет условия структурообразования и характер взаимодействия на границе волокно–полимерная матрица, улучшает смачиваемость наполнителя, придает поверхности волокна гидрофобные свойства. Аппрет можно наносить на стекловолокно, например ровинг марки 4Э, 4П, или вводить в связующее. В последнем случае существует оптимальное содержание аппрета, при котором повышается прочность связи стекловолокно–смола, уменьшаются остаточные микронапряжения.

Правильным подбором аппрета можно регулировать остаточные микронапряжения, снижая растягивающие, уменьшая вероятность образования микротрещин, увеличивая сжимающие, т. е. повышая прочность связи смола–стекло.

Эффективным способом улучшения свойств полимерных композиций является использование в них комбинаций наполнителей. Для обеспечения высокой прочности при контактных нагрузках в ПКЗ, дисперсно-армированных волокном, в качестве наполнителей используют сферические или близкие к ним по форме включения. Необходимо отметить, что минеральные наполнители оказывают каталитическое действие на отверждение смол, что сказывается на их жизнеспособности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем отличие механической обработки ПКМ от металлических сплавов?
2. Какие методы соединения деталей из ПКМ существуют?
3. Как осуществляется соединение с помощью метода жертвенного слоя?
4. В чем особенности соединения клепкой ПКМ?
5. В каких случаях оправдано применение полимерных компенсирующих заполнителей?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Brent Strong A.* Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications. Third edition. – Society of Manufacturing Engineers, 2007. – 640 p.
2. *Alan A. Baker.* Composite Materials for Aircraft Structures. Third edition. AIAA American Institute of Aeronautics & Ast., 2016 – 600 p.
3. *Kuen Y. Lin.* Composite Materials: Materials, Manufacturing, Analysis, Design and Repair, 2015 – 222 p.
4. *Michael C.Y. Niu* – Composite airframe structures. Third edition. – Hong Kong Conmilit Press Ltd, 2010. – 500 p.
5. *Андреева А.В.* Основы физикохимии и технологии композитов: учебное пособие для вузов. – М.: ИПРЖР, 2001. – 192 с.
6. *Бобин К.Н.* Совершенствование процессов ремонта композиционных панелей воздушных судов зарубежного производства / К.Н. Бобин, П.Н. Бобин, Н.А. Рынгач и др. // Авиационная промышленность. – 2018. – № 2. – С. 67–70.
7. *Братухин А.Г.* Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении / А.Г. Братухин, В.С. Боголюбов, О.С. Сироткин. – М.: Готика, 2003. – 516 с.
8. *Буланов И.М.* Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композитных материалов / И.М. Буланов, В.В. Воробей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.
9. *Васильев В.В.* Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
10. *Кербер М.Л.* Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии: учебное пособие. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
11. *Криштопа Н.А.* Обработка отверстий в композиционных и неметаллических материалах / Н.А. Криштопа, С.П. Радзевич, А.И. Бобко. – Киев: Техника, 1980. – 126 с.
12. *Михайлин Ю.А.* Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. – СПб.: Научные основы и технологии (НОТ), 2013. – 658 с.
13. *Михайлин Ю.А.* Специальные полимерные композиционные материалы. – СПб.: Научные основы и технологии (НОТ), 2009. – 658 с.

14. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 822 с.
15. Справочник по композиционным материалам: В 2 кн. Кн. 1 / под ред. Дж. Любина. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.
16. Справочник по композиционным материалам: В 2 кн. Кн. 2 / под ред. Дж. Любина. – М.: Машиностроение, 1988. – 584 с.
17. Эмиров А.В. Применение ультразвуковых дефектоскопов с фазированными антенными решетками при контроле изготовления композиционных изделий / А.В. Эмиров, Н.А. Рынгач, К.Н. Бобин и др. // Авиационная промышленность. – 2018. – № 3-4. – С. 76–81.

**Рынгач Николай Анатольевич
Бобин Константин Николаевич
Курлаев Николай Васильевич**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие

Редактор *И.Л. Кескевич*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 25.12.2019. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 50 экз.
Уч.-изд. л. 4,88. Печ. л. 5,25. Изд. № 223. Заказ № 231. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20