

Содержание

Введение	9
Раздел 1 Соединения в авиационных конструкциях	12
1.1. Конструктивно-технологическая характеристика летательных аппаратов	12
1.2. Краткая характеристика материалов авиационных конструкций	17
1.2.1. Титановые сплавы	20
1.2.2. Алюминиевые сплавы	21
1.2.3. Сталь	21
1.2.4. Волокнистые полимерные композиционные материалы	21
1.2.5. Гальваническая совместимость материалов	27
1.3. Соединения в авиационных конструкциях	29
1.3.1. Классификация соединений	29
1.3.2. Механические соединения	32
1.3.2.1. Клепанные соединения	32
1.3.2.2. Шпильчно-болтовые соединения	34
1.3.2.3. Болт-заклепочные соединения	35
1.3.3. Несущая способность соединений	37
1.3.4. Масса элементов соединений	42
1.3.5. Трудоемкость выполнения соединений	43
1.3.6. Примеры выполнения соединений высоконагруженных узлов и деталей	45
1.4. Краткая характеристика рабочих процессов	49
1.4.1. Резание осевым инструментом	49
1.4.2. Спиральное фрезерование	50
1.4.3. Вырубка	52
1.4.4. Гидроабразивная резка	52
1.4.5. Лазерная резка	53
1.4.6. Электроэрозионная обработка	54
Выводы	55

Раздел 2 Качество отверстий	57
2.1. Показатели качества отверстий в однородных пакетах ВПКМ	57
2.1.1. Повреждения отверстий	59
2.1.2. Точность отверстий	69
2.1.3. Микрорельеф поверхности	75
2.2. Качество отверстий в смешанных пакетах	80
2.3. Общие требования к качеству отверстий	89
Выводы	92
Раздел 3 Основы резания волокнистых полимерных композиционных материалов	95
3.1. Механика прямоугольного резания	95
3.1.1. Стружкообразование	95
3.1.2. Влияние различных факторов на процесс стружкообразования	99
3.1.3. Влияние различных факторов на силу резания	106
3.1.4. Тепловые процессы	112
3.2. Общие представления об износе инструментов	113
3.2.1. Виды износа	113
3.2.2. Механизмы изнашивания	114
3.2.3. Критерии износа и стойкость инструмента при резании ВПКМ	117
Выводы	119
Раздел 4 Технологические особенности обработки отверстий при сборке авиационных конструкций	121
4.1. Общая характеристика технологических процессов выполнения болтовых и заклепочных соединений	121
4.2. Технологические особенности обработки отверстий под болты и заклепки	126
4.2.1. Формирование отверстий	130
4.2.1.1. Ручное сверление	135
4.2.1.2. Сверление с механической подачей	137
4.2.2. Изготовление гнезд под потайную головку	137
4.2.3. Окончательная обработка отверстий	141
4.2.3.1. Зенкерование	141
4.2.3.2. Развертывание	141
4.2.3.3. Протягивание	145

4.2.5. Обработка высокоточных отверстий	146
4.2.5. Упрочнение отверстий	147
Выводы	149
Раздел 5 Особенности сверления отверстий в пакетах, содержащих ВПКМ	150
5.1. Механика стружкообразования	150
5.2. Осевая сила и крутящий момент	152
5.3. Тепловые процессы	158
5.4. Износ и стойкость сверл	160
5.5. Влияние различных факторов на расслаивание обрабатываемого материала	165
5.5.1. Влияние режима резания	166
5.1.2. Влияние износа сверла	167
5.5.3. Влияние геометрических параметров и конструкции инструмента	169
5.5.4. Влияние материала матрицы и формы армирования	172
Выводы	173
Раздел 6 Инструментальное обеспечение рабочих процессов обработки отверстий в волокнистых полимерных композиционных материалах	176
6.1. Особенности применения современных инструментальных материалов	176
6.1.1. Твердые сплавы	179
6.1.2. Поликристаллический алмаз	181
6.1.3. Эффект от применения покрытий	182
6.2. Обрабатываемость аэрокосмических материалов	187
6.3. Инструменты для обработки отверстий	189
6.3.1. Сверла	189
6.3.1.1. Конструкции цельных сверл	189
6.3.1.2. Конструкции сборных сверл	192
6.3.1.3. Формы вершины (режущей части) спиральных сверл	198
6.3.1.4. Влияние параметров сверла на показатели процесса сверления	205
6.3.1.5. Режимы резания и сравнение эффективности различных сверл	210

6.3.2. Инструменты для чистовой обработки отверстий	212
6.3.3. Инструмент для снятия заусенцев и обработки фасок	215
6.3.4. Комбинированный осевой инструмент	218
Выводы	223
Раздел 7 Технологические методы обеспечения качества отверстия	225
7.1. Применение опорной пластины	226
7.2. Применение направляющего отверстия	226
7.3. Применение термического воздействия на инструмент	228
7.4. Нетрадиционные кинематические схемы резания	229
7.4.1. Сверление с вибрациями	229
7.4.2. Прерывистое сверление	230
7.4.3. Сверление с адаптивным управлением подачи	231
7.4.4. Спиральное фрезерование	232
7.5. Сравнительная оценка технологических процессов в условиях стапельного сборочного производства летательных устройств	234
Выводы	240
Раздел 8 Оборудование для обработки отверстий	242
8.1. Портативные ручные машины	244
8.2. Стационарные машины и агрегаты	247
8.3. Машины для обработки отверстий методом спирального фрезерования	253
8.4. Приспособления агрегатно-сборочного производства	255
Выводы	259
Заключение	261
Список литературы	262

Введение

Использование современных CAD/CAM-систем для проектирования, подготовки производства, а также применение эффективного автоматизированного оборудования при изготовлении высоконагруженных конструкций из волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ) позволяют минимизировать объем или полностью исключить механическую обработку отформованных композитных деталей.

Несмотря на достигнутый высокий уровень интегрированности авиационных конструкций из ВПКМ, узлы, отсеки и агрегаты планера самолета являются преимущественно сборными. Сборка таких конструкций выполняется с использованием различных видов крепежных элементов – как традиционных, так и специальных (болтов, заклепок и др.).

В связи со значительными габаритами сборных элементов конструкций из ВПКМ современных, прежде всего, пассажирских самолетов количество крепежных элементов, устанавливаемых в процессе их сборки, составляет десятки тысяч штук. Такое же количество отверстий с требуемыми геометрическими, точностными и качественными показателями должно быть выполнено в собираемых конструкциях. Эти конструкции, кроме деталей из ВПКМ, могут включать элементы, изготовленные из титановых, алюминиевых и других сплавов.

Специфические особенности агрегатно-сборочного производства авиационных конструкций, в том числе из ВПКМ, исключают возможность использования для обработки отверстий под крепежные элементы стационарного механообрабатывающего оборудования, смазочно-охлаждающих жидкостей, ряда других технологических методов и средств, традиционных для механообрабатывающего производства.

Этими обстоятельствами обусловлена возрастающая актуальность разработки эффективных методов и средств механической обработки ВПКМ, в частности выполнения точных отверстий под крепежные элементы.

Представленные ниже материалы подготовлены по результатам выполненного авторами аналитического обзора открытых отечественных и зарубежных публикаций, посвященных данной проблеме. Целью исследования являлось определение общих тенденций развития

технологии механической обработки ВПКМ в условиях сборочного производства авиационных конструкций, а также выявление отдельных эффективных технических решений, которые могут быть адаптированы в технологическую среду отечественного самолетостроения.

Монография состоит из восьми разделов. В первом разделе рассмотрены основные термины, связанные с композиционными материалами вообще и с технологией их механической обработки в частности.

Во втором разделе приведена информация о критериях качества обработанных поверхностей ВПКМ, в том числе и качества отверстий. Слоистая структура ВПКМ делает невозможным применение традиционных для металлических материалов показателей качества. Поэтому в данном разделе авторы большое внимание уделили специфическим для ВПКМ показателям качества, методам их оценки.

В третьем разделе изложены основы теории резания ВПКМ лезвийным инструментом. На основе данных о прямоугольном свободном резании исследовано влияние структуры ВПКМ, геометрии режущего инструмента и факторов на стружкообразование, силу и температуру резания, износ инструмента.

В четвертом разделе рассмотрены технологические особенности обработки отверстий при сборке авиационных конструкций. Дана общая характеристика технологических процессов выполнения болтовых и заклепочных соединений, описаны способы достижения высокой точности и качества отверстий.

Пятый раздел посвящен особенностям обработки отверстий в разнородных пакетах, содержащих ВПКМ. Рассмотрено влияние различных факторов на силу и температуру резания, стойкость инструмента и качество обрабатываемого отверстия.

В шестом разделе выполнен анализ современного инструментального обеспечения рабочих процессов обработки отверстий в ВПКМ. Кратко охарактеризованы особенности применения современных инструментальных материалов для обработки ВПКМ, конструкции осевых режущих инструментов для формирования отверстий в ВПКМ и методы их применения.

В седьмом разделе дана сравнительная оценка современных технологических методов обеспечения качества отверстия в ВПКМ. Рассмотрены как традиционные методы, например, метод опорной пластины, так и новые, совсем недавно появившиеся, например, метод спирального сверления.

В восьмом разделе содержится краткий обзор оборудования для обработки отверстий, включая портативные и стационарные машины, машины для обработки отверстий методом спирального фрезерования и приспособления агрегатно-сборочного производства.

Надеемся, что монография будет полезна магистрам, аспирантам и инженерно-техническим работникам машиностроительной и авиационной отраслей промышленности и внесет вклад в развитие технологий обработки волокнистых полимерных композиционных материалов.

Авторы благодарят за помощь, предоставленную информацию и оказанные консультации ПАО «Украинский научно-исследовательский институт авиационной технологии» и лично директора института, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники Украины Г. А. Кривога, а также руководителя центра инжиниринга, технологий и систем производства института, кандидата технических наук, заслуженного работника промышленности Украины В. А. Матвиенко.

Глубокую признательность выражаем компании ISCAR и ее официальному представителю на территории Украины компании ООО «Искар Украина» за информационную и финансовую поддержку издания книги.

Соединения в авиационных конструкциях

1.1. Конструктивно-технологическая характеристика летательных аппаратов

Повышение эффективности процессов проектирования и изготовления современных конструкций планера летательных аппаратов (ЛА) тесно связаны. Несмотря на повышение стоимости, вызванное увеличением объемов использования более дорогих компонентов и узлов, для максимального снижения массы ЛА применяются дорогостоящие волокнистые полимерные композиционные материалы (ВПКМ), титановые и алюминиевые сплавы (рис. 1.1). Наибольшая часть затрат при производстве самолетов (более 45%) связана с проектированием, изготовлением и сборкой планера ЛА, в то время как стоимость двигателей, например, для реактивных самолетов составляет не более 20–25% общей стоимости [1].

Известно, что конструкция планера ЛА и технология его изготовления находятся в неразрывной взаимосвязи. При этом вначале изменяется конструкция ЛА, а затем технология его изготовления. Борьба



Рис. 1.1. Баланс затрат при создании самолета [1]

за уменьшение массы планера, а также увеличение его ресурса и надежности привела [2]:

- к переходу в широкофюзеляжных самолетах на неразъемные конструкции крыла и фюзеляжа, т.е. к отказу от конструктивных разъемов по всем основным частям планера;
- к использованию для изготовления панелей толстолистовых обшивок размером до 25х2 м, т.е. к увеличению геометрических размеров панелей, балок, лонжеронов, шпангоутов, выполняемых из монолитных заготовок;
- к применению ВПКМ и использованию сварных панелей с сотовыми наполнителями из титановых и других металлических сплавов;
- к использованию комбинированных монолитно-сборных панелей, состоящих из толстолистовых заготовок, подкрепленных мощным стрингерным набором, или панелей из склеенных тонколистовых заготовок.

Узлы и панели ЛА можно объединить в группы по конструктивно-технологическим признакам. Такое объединение позволяет разрабатывать технологические процессы и оснастку не на отдельные узлы, а на группы узлов, сходные по конструктивно-технологическим признакам, а также использовать типовые технологические процессы и унифицированную оснастку [3].

Выбор способов базирования отдельных узлов и деталей при сборке ЛА обусловлен высокими требованиями к их точности и взаимозаменяемости, определяемыми принадлежностью узла к соответствующим функциональным контурам. Поэтому при проектировании и изготовлении рассматривают как узлы, выходящие на аэродинамический обвод, так и имеющие стыки и разъемы с другими элементами конструкции, не связанными с ним.

Последовательность выполнения сборочных операций зависит от конструкции, габаритных размеров и жесткости собираемых деталей и узлов, а также от схемы их базирования при сборке ЛА [3].

Последовательность сборки и конструкцию сборочной оснастки определяют геометрические свойства узлов. Выделяют такие узлы: условно плоские и плоские, криволинейные в пространстве с одинарной или линейчатой кривизной, криволинейные в пространстве с двойной кривизной или круткой [3].

Состав сборочных операций и последовательность их выполнения в значительной степени зависят также от способа герметизации

стыковых соединений. В последнее время разработаны эффективные способы герметизации различных типов стыков и различных элементов конструкции. Так, например, применяются поверхностная герметизация с использованием облегченного жгутика, прерывистая внутришовная герметизация, поверхностная герметизация с наложением дополнительного жгутика и др. [3].

В общем случае типовой технологический процесс сборки любого элемента конструкции ЛА состоит из таких операций [2, 3]:

- 1) подготовка деталей и сборочных узлов к сборке;
- 2) предварительная установка, закрепление и раскрепление деталей;
- 3) разборка деталей и сборочных узлов;
- 4) доводка деталей и сборочных узлов;
- 5) окончательная установка и закрепление деталей и сборочных узлов;
- 6) окончательное соединение деталей и сборочных узлов;
- 7) проверка собранного изделия в соответствии с чертежами, техническими условиями (ТУ) и техническими требованиями (ТТ).

Особое значение при сборке конструкций ЛА имеет объемная увязка деталей и узлов, обеспечивающих получение аэродинамических обводов заданной точности [2]. Современный уровень проектирования любого изделия предусматривает создание его трехмерной компьютерной модели. При этом параллельно создается модель технологической оснастки, обеспечивающей правильную взаимную ориентацию деталей при сборке. Повышение производительности сборочных работ обеспечивается механизацией и автоматизацией проведения основных типовых технологических операций: разметки, кроя, сверления и клепки.

Время сборки в цикле изготовления ЛА в среднем составляет 50–75%, а ее трудоемкость 30–40% трудоемкости изготовления всего ЛА [2, 3, 4].

Основным способом соединения силовых узлов конструкции планера ЛА (лонжеронов, нервюр и шпангоутов), которые относятся к плоскокаркасным узлам (ПКУ), является использование заклепочных соединений. На долю сверильно-клепальных работ (СКР) приходится не менее 30–45% трудоемкости сборочных работ (по некоторым данным, например [3], 40–60%). В среднем при изготовлении заклепочного соединения трудоемкость сверления составляет 30%, зенкерования – 13%, установка заклепок – 4%, расклепывание заклепок – 53%.

На рис. 1.2 показана последовательность выполнения трех основных типовых операций сборки крыла [4]: установка и фиксация лон-

жеронов и ребер (а), установка и закрепление обшивки с помощью заклепок (б), присоединение передних кромок и законцовок крыла, рулей и других его элементов (в). Сложность конструкции, многообразии вариантов доступа к зоне клепки, большая номенклатура заклепок по размерам, малая протяженность швов и другие факторы ограничивают применение станков с ЧПУ и автоматов для выполнения операций механической обработки и клепки при сборке ЛА. Это обуславливает широкое и преимущественное использование ручных сверлильных машин и клепальных молотков, что не позволяет достигнуть высокой производительности труда, не гарантирует стабильности требуемого качества соединений и, как правило, вредно воздействует на организм человека.

Уровень механизации и автоматизации технологических процессов изготовления ПКУ определяется используемым методом сборки. Распространены два метода сборки ПКУ – по сборочным отверстиям (СО) и в сборочном приспособлении (СП). Сущность первого метода заключается в том, что базирование деталей относительно друг друга осуществляется совмещением специально предусмотренных технологических отверстий. Эти отверстия выполняются с помощью 3D компьютерных моделей еще на этапе изготовления деталей. Сущность второго метода – базирование деталей относительно базовых поверхностей по элементам фиксации СП [3].

В последние годы для совмещения деталей и отверстий при сборке ПКУ все чаще используется метод сборки с помощью лазерного проецирования (рис. 1.3).

Сравнительно частая сменяемость объектов сборки, малая жесткость деталей и узлов, необходимость постоянного увеличения точности выполнения наружных обводов и мест сопряжений конструкций ЛА приводят к введению на многих деталях и узлах определенных

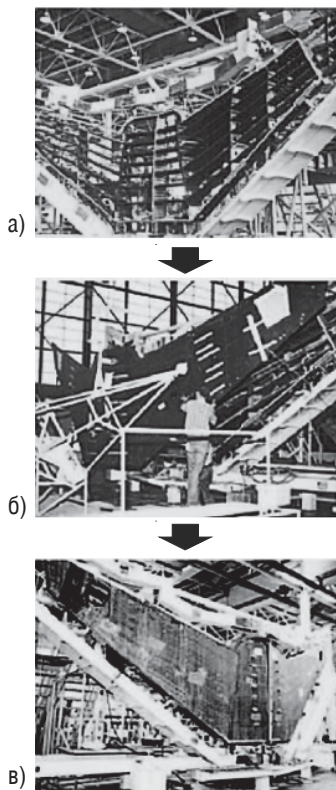


Рис. 1.2. Типовые операции сборки ЛА [4]

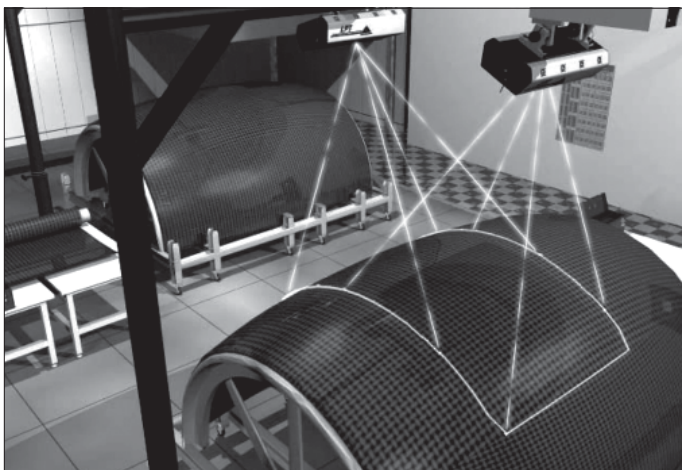


Рис. 1.3. Сборка с применением лазерного проектирования¹.

припусков, которые удаляются при сборке механической обработкой в процессе подгонки, не исключаяющей использования любого метода сборки авиационных конструкций. Подгонка может осуществляться как ручным, так и механизированным способами путем обрезки припусков на листовых деталях, опилования кромок и плоскостей деталей, шабрения сопрягаемых плоскостей, фрезерования поверхностей, сверления и развертывания отверстий, подгибки листовых деталей по контуру, деформирования и других операций. Каждому методу сборки присущи свои способы выполнения подгоночных работ.

Подгонка деталей по месту иногда является технически необходимой, особенно если она является единственным способом достижения высококачественного сопряжения в многозвенной размерной цепи.

¹ По материалам сайта : <http://www.lptcorp.com>