

УДК 629.7
ББК 39.5
Г 157

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *А. А. Барзов*
доктор технических наук *В. А. Горелов*

Галиновский А. Л., Бочкарев С. В., Нелюб В. А.
Г 157 Технологии производства и диагностики композитных
конструкций летательных аппаратов [Текст] : учебное
пособие / А. Л. Галиновский, С. В. Бочкарев, В. А. Нелюб. —
Старый Оскол : ТНТ, 2019. — 384 с. : ил.

ISBN 978-5-94178-645-9

Приведены основные сведения для расчёта и разработки технологии производства конструкций из композитных материалов, рассмотрены особенности их создания, основные свойства и характеристики компонентов. Изложены основные технологические схемы производства и диагностики конструкций летательных аппаратов, описаны математические модели намотки и отверждения.

Предназначено для студентов технических вузов, обучающихся по направлению «Авиационная и ракетно-космическая техника», также будет полезно аспирантам и преподавателям.

УДК 629.7
ББК 39.5

Исследования выполнялись в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ (НШ-3778.2018.8) и гранта РФФИ 18-29-18081

ISBN 978-5-94178-645-9

© Галиновский А. Л., Бочкарев, С. В.,
Нелюб В. А., 2019
© Оформление. ООО «ТНТ», 2019

Оглавление

Введение	8
ГЛАВА 1. КОМПОНЕНТЫ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	12
1.1. Армирующие материалы для композитных материалов	12
1.1.1. Стекланные волокна	12
1.1.2. Ровинг	18
1.1.3. Маты	19
1.1.4. Пряжа	20
1.1.5. Ткани из стекловолокон	21
1.1.6. Арамидные (органические) волокна.....	24
1.1.7. Полиэтиленовые волокна.....	29
1.1.8. Волокна на базе термотропных и лиотропных жидкокристаллических полимеров.....	30
1.1.9. Волокна из окиси алюминия	32
1.1.10. Углеродные волокна.....	33
1.1.11. Борные волокна	45
1.1.12. Керамические оксидные волокна	47
1.1.13. Карбидокремневые волокна	48
1.2. Связующие	50
1.2.1. Эпоксидные связующие	51
1.2.2. Полиэфирные связующие	53
1.2.3. Фенолформальдегидные связующие	54
1.2.4. Кремнийорганические связующие	55
1.2.5. Полиимидные связующие	55
1.2.6. Технологические свойства связующих	57
1.2.7. Определение теплостойкости.....	61
1.2.8. Механизм отверждения связующих.....	63
1.2.9. Механизм передачи напряжения от матрицы к наполнителю	67
1.2.10. Влияние натяжения на прочность и модуль упругости композита.....	71
1.2.11. Влияние жёсткости связующего на прочность композита	75
<i>Контрольные вопросы</i>	76

ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	78
2.1. Формование конструкций	79
2.1.1. Контактное формование	79
2.1.2. Формование напылением	81
2.1.3. Формование прессованием	82
2.1.4. Формование с эластичной диафрагмой	83
2.1.5. Формование протяжкой	85
2.1.6. Непрерывные производственные процессы. Пултрузия.....	86
2.1.7. Намотка	88
2.1.8. Методы намотки.....	90
2.1.9. Формование оболочек методом локального прижима уплотняющим роликом.....	93
2.2. Контроль составов композитов и характеристик связующего.....	95
2.3. Особенности пропитки при «мокрой» и «сухой» намотке	98
2.4. Производство и технологические свойства препрега	101
2.5. Выбор и программирование натяжения при намотке	104
2.6. Контроль натяжения армирующих материалов	113
2.7. Формование конструкции	118
2.8. Определение технологических режимов отверждения	120
2.9. Математическая модель определения основных технологических параметров изготовления намоточных конструкций	131
2.10. Оправки	138
2.10.1. Материалы и технологические процессы, используемые при изготовлении оправок	141
2.10.2. Технология изготовления оправок из песчано-полимерной композиции	145
2.10.3. Термографический метод исследования термостойкости ПВС	148
2.10.4. Практические рекомендации по усилению прочности ППК при повышенных температурах	150
<i>Контрольные вопросы</i>	151
 ГЛАВА 3. УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	 153
3.1. Структура УУКМ	154
3.2. Матрица УУКМ	157
3.3. Микроструктура УУКМ	159
3.4. Технологические способы осаждения пироуглерода	160
3.5. Комбинированный метод: насыщение и пропитка	163
<i>Контрольные вопросы</i>	164

ГЛАВА 4. ОБРАБОТКА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	165
4.1. Проблемы и задачи механической обработки композитных материалов	165
4.2. Особенности механической обработки полимерных композитных материалов	167
4.3. Комбинированные методы предварительной и дополнительной обработки полимерных композитных материалов	172
4.4. Термическая обработка полимерных материалов	172
4.5. Обработка с применением импульсных источников энергии	175
4.6. Обработка полимерных материалов технологической средой ...	176
4.7. Особенности получения отверстий в полимерных композитных материалах.....	177
4.8. Лазерная резка полимерных композитных материалов	183
4.9. Лазерная резка слоистых пластиков	184
4.10. Лазерная резка кварцевого стекла.....	185
<i>Контрольные вопросы</i>	187
ГЛАВА 5. ВЫБОР РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	188
5.1. Выбор режимов резания при механической обработке пластмасс. Точение	188
5.2. Выбор режимов резания при механической обработке пластмасс. Сверление	201
5.3. Выбор режимов резания при механической обработке пластмасс. Фрезерование	214
5.4. Выбор режимов резания при механической обработке стеклопластиков. Точение	225
5.5. Выбор режимов резания при механической обработке стеклопластиков. Сверление	236
5.6. Выбор режимов резания при механической обработке стеклопластиков. Фрезерование	244
5.7. Обработка изделий из углепластика, органопластика и боропластика.....	254
5.8. Выбор режимов резания при механической обработке изделий из углепластика, органопластика и боропластика. Точение	255
5.9. Выбор режимов резания при механической обработке изделий из углепластика, органопластика и боропластика. Сверление	260
5.10. Выбор режимов резания при механической обработке изделий из углепластика, органопластика и боропластика. Фрезерование	264
<i>Контрольные вопросы</i>	269

ГЛАВА 6. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	270
6.1. Общая характеристика средств неразрушающего контроля	270
6.2. Достоинства и недостатки неразрушающих методов контроля	272
6.3. Дефекты структуры композитных материалов в процессе переработки их в изделия	273
6.4. Дефекты композитных материалов и методы их контроля	276
6.5. Прогнозирование прочности	278
6.6. Настройка аппаратуры контроля	281
6.7. Классификация акустических методов контроля	283
6.7.1. Акустический метод отражённого излучения (эхо-импульсный метод)	283
6.7.2. Акустический метод прошедшего излучения (импульсный теневой метод)	284
6.7.3. Акустический реверберационный метод	285
6.7.4. Радиационный метод	286
6.8. Ультразвуковая дефектоскопия	287
6.9. Контроль прочности (на примере стеклопластиков)	290
6.10. Газоразрядная дефектоскопия	291
6.11. Импедансный метод	294
6.12. Велосимметрический метод	296
6.13. Принципы развития методов неразрушающего контроля композитных материалов	298
<i>Контрольные вопросы</i>	302

ГЛАВА 7. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ПРОЧНОСТЬ И ГЕРМЕТИЧНОСТЬ	303
7.1. Общая характеристика испытаний	303
7.2. Испытания на прочность	304
7.3. Порядок выбора и назначений методов контроля герметичности	306
7.4. Методы контроля суммарной герметичности	308
7.4.1. Вакуумные методы	308
7.4.2. Методы накопления при атмосферном давлении	315
7.4.3. Метод спада давления	317
7.4.4. Метод контроля мундштуком	319
7.5. Методы контроля локальной герметичности	320
7.5.1. Вакуумные методы	320
7.5.2. Пузырьковые методы	325
7.5.3. Химические методы	332
7.6. Схема технологического процесса испытаний	335

7.7. Разработка технического задания на проектирование установки для гидроиспытаний	337
7.7.1. Краткое описание технологического процесса испытаний	338
7.7.2. Требования к узлам установки гидроиспытаний	338
7.7.3. Энергетическое обеспечение и требование по удельной нагрузке для пола участка гидроиспытаний	340
7.7.4. Проектирование бронекамер для проведения гидроиспытаний	341
<i>Контрольные вопросы</i>	348
Заключение	349
Приложения	351
1. Примеры технических требований к методам контроля в конструкторской документации	351
2. Проектирование конструкторско-технологических параметров оболочки типа «кокон»	353
3. Расчёт технологических параметров связующего и контроль качества оболочки	369
Библиографический список	380

Введение

Научно-технический прогресс в машиностроении в основном связывают с разработкой и широким применением композитных материалов. Наличие целого комплекса специфических свойств, таких как высокая удельная прочность и модуль упругости, низкий удельный вес, анизотропия, невысокие теплофизические характеристики и другие, в ряде случаев выгодно отличает применение композитных материалов в современных конструкциях от применения традиционных материалов (металлов). Так, использование композитных материалов даёт экономический эффект на 1 кг массы в самолёте 150 \$, в вертолёте — 300 \$, ракете, спутнике — 10 000 \$, в сложном космическом аппарате — 50 000 \$. Использование композитных материалов в конструкциях приводит к снижению энергозатрат. При производстве конструкций из различных материалов удельные затраты электроэнергии (кВт/ч) в расчёте на 1 кг готовой конструкции составят: для эпоксиглепластика — 72,7; стали — 220,4; алюминия — 392,4; титана — 1543,2. В настоящее время нет никаких сомнений в том, что развитие и мировое применение этих материалов является одним из определяющих факторов научно-технического и оборонного потенциала любой страны. Специфические особенности композитных материалов требуют особого подхода как к проектированию конструкций, так и к разработке технологических процессов.

Опыт производства конструкций из композитных материалов показал, что наиболее ответственной и трудоёмкой стадией технологического процесса являются операции формования, так как именно на этом этапе в первую очередь создаётся

структура материала, определяется точность геометрических форм, закладывается основа высокого качества и надёжности.

Организация и осуществление формования конструкций из композитных материалов с высокими и стабильными физико-механическими характеристиками требуют от конструктора и технолога выполнения большого объёма работ, связанных с выбором армирующего материала и связующего, метода и режима изготовления и проведения необходимых конструкторско-технологических расчётов.

Цель учебного пособия — освоение дисциплинарных компетенций по основам конструирования и производства изделий летательных аппаратов из композитных материалов, которые позволят успешно решать теоретические и практические задачи в профессиональной деятельности, связанной с формированием базовой инженерной подготовки, получение комплекса знаний о наиболее широко применяющихся в авиа- и ракетостроении композитных материалах, их строении и особенностях их физико-механических характеристик, способах получения и технологии изготовления изделий.

В процессе изучения пособия обучающийся расширяет и углубляет знания в части следующих компетенций: применение способов рационального использования сырьевых, энергетических и других видов ресурсов в процессе отработки и последующего изготовления и эксплуатации двигателей летательных аппаратов; способность принимать участие в работах по расчёту и конструированию отдельных деталей и узлов двигателей и энергетических установок летательных аппаратов в соответствии с техническими заданиями и использованием стандартных средств автоматизации проектирования; способность внедрять в производство авиационных и ракетных двигателей и энергоустановок летательных аппаратов перспективные конструкционные материалы, а также новые способы формообразования и воздействия на полуфабрикаты, заготовки, детали и готовые изделия.

Задачи дисциплины: освоение общих основ конструирования и производства изделий из композитных материалов;

формирование умения выбирать рациональные конструктивные схемы, удовлетворяющие требованиям аэродинамики, прочности, жёсткости, минимальной массы, эксплуатации и технологии производства с учётом назначения летательного аппарата, и оформлять законченные проектно-конструкторские работы; формирование навыков использования теоретических и практических материалов в работах по проектированию и технологии изготовления летательных аппаратов с использованием современных средств автоматизированного проектирования; привитие изучающим навыков конструирования летательных аппаратов из композитных материалов с проведением необходимых проектировочных расчётов для определения основных массово-габаритных характеристик летательного аппарата.

При изучении пособия обучающийся должен освоить указанные компетенции и продемонстрировать следующие результаты:

- **знать** полимерные композитные материалы, области применения каждого из них в конструкции летательных аппаратов;
- основные ингредиенты полимерных композитных материалов, требования, предъявляемые к ним, способы получения; наиболее распространённые способы изготовления деталей из полимерных композитных материалов; физико-химические основы, параметры процессов, их влияние на качество изделий; контроль качества изделий; особенности конструкций оснастки, применяемой для изготовления изделий из композитных материалов; требования техники безопасности и охраны труда и окружающей среды при работе с композитными материалами и оборудованием;
- **уметь** пользоваться справочной литературой, выбирать марку материала с учётом условий эксплуатации изделия и реальных возможностей производства; формулировать требования к технологической оснастке и оборудованию, определять режимы переработки материала, исходя из его химического строения и технологических свойств; выбрать оптимальный способ изготовления,

исходя из конструктивных особенностей детали, серийности и условий эксплуатации; определять средства контроля для определения качества на всём протяжении технологического цикла;

- **владеть** основами подготовки производства изделий из полимерных композитных материалов; методологией конструирования изделий из всех видов полимерных материалов, в том числе основами САПР; методами оценки технологических и эксплуатационных свойств полимерных материалов и их основных компонентов; принципами, методами и методологией рационального выбора или разработки оригинальных полимерных композитных материалов для конструирования изделий с учётом требований заказчика; навыками использования методов и способов статистического анализа для определения качества выпускаемой продукции; навыками использования справочной литературы и оформления специальной технической документации при анализе качества выпускаемой продукции.

В издании рассматриваются вопросы, связанные с выбором армирующих материалов, связующих, методов формования конструкций из композитных материалов, а также приводятся основные данные по расчёту технологических режимов намотки, отверждения и механической обработки.

Исследования выполнялись в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ (НШ-3778.2018.8) и гранта РФФИ 18-29-18081.