

**Посвящается 80-летию
кафедры СМ-12
«Технологии ракетно-космического
машиностроения»
МГТУ им. Н. Э. Баумана**

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

СОЗДАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Под редакцией М. А. Комкова, А. Л. Галиновского

Допущено Федеральным учебно-методическим объединением
в системе высшего образования по укрупненной группе
специальностей и направлений подготовки
«Авиационная и ракетно-космическая техника»
в качестве учебника для студентов и аспирантов,
обучающихся по основным образовательным программам
высшего образования по направлению подготовки
«Авиационная и ракетно-космическая техника»

Старый Оскол
ТНТ
2020

УДК 629.7

ББК 39.6

К 633

Авторы:

*М. А. Комков, С. В. Бочкарев, А. Л. Галиновский, В. А. Нелюб,
В. А. Тарасов, В. А. Романенков, В. Д. Баскаков*

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *А. С. Чумадин*

доктор технических наук, профессор *В. А. Моисеев*

К 633 Технология производства и диагностика качества композитных конструкций ракетно-космической техники. Создание конструкций из волокнистых композитных материалов [Текст] : учебник / М. А. Комков [и др.]; под ред. М. А. Комкова, А. Л. Галиновского. — Старый Оскол : ТНТ, 2020. — 344 с. : ил.

ISBN 978-5-94178-647-3

Изложены основные сведения о технологических методах изготовления и конструктивных решениях изделий из композитных материалов, получение многослойных композитных оболочек изделий РКТ. Рассмотрены принципы проектирования оболочек сосудов давления, изготовленных намоткой нитей, технологические процессы и намоточные станки открытой и орбитальной намотки композитных конструкций. Рассмотрены методы прессования в производстве композитных конструкций на основе реактопластов, формование композитных изделий в жесткой оснастке методом пропитки под давлением и вакуумной инфузии. Изложены проблемы и задачи механической обработки композитных материалов резанием. Рассмотрены структуры композитных материалов, получение и свойства непрерывных волокнистых наполнителей, УУКМ, полимерные матрицы и термореактивные связующие для намоточных конструкций. Приведены методы определения механических характеристик слоистых полимерных композитных материалов. Рассмотрен состав, свойства и область применения УУКМ. Приведены конструкторско-технологические решения и результаты экспериментальных исследований композитных и комбинированных торOIDальных баллонов, криволинейных трубопроводов, сферических оболочек.

Учебник предназначен для преподавателей, студентов, магистрантов и аспирантов технических вузов, обучающихся по направлению «Ракетные комплексы и космонавтика» и специальности «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов».

Исследования выполнялись в рамках грантов РФФИ 18-29-18081 и 19-38-90228/19, гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-3778.2018.8 и грантов от фонда содействия инновациям по программе УМНИК-18 (в) в соответствии с договором №14727ГУ/2019 и № 14549ГУ/2019.

УДК 629.7

ББК 39.6

ISBN 978-5-94178-647-3

© Комков М. А., Бочкарев С. В.,
Галиновский А. Л., Нелюб В. А.,
Тарасов В. А., Романенков В. А.,
Баскаков В. Д., 2020
© Оформление. ООО «ТНТ», 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Предисловие | 8 |
| Введение | 10 |
| Глава 1 | |
| ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РКТ | 23 |
| 1.1. Получение композитных профильных изделий методом пултрузии | 25 |
| 1.2. Получение многослойных композитных оболочек изделий РКТ. Метод контактного формования..... | 30 |
| 1.3. Метод намотки в производстве композитных конструкций летательных аппаратов и РКТ | 47 |
| 1.4. Методы прессования в производстве композитных конструкций на основе реактопластов | 61 |
| 1.5. Формование композитных изделий в жесткой оснастке методом пропитки под давлением и вакуумной инфузии..... | 70 |
| 1.6. Методы механической обработки полимерно-волокнистых материалов и керамических композитов резанием | 85 |
| 1.6.1. Проблемы и задачи механической обработки композитных материалов резанием | 85 |
| 1.6.2. Комбинированные методы предварительной и дополнительной обработки полимерных композитных материалов | 92 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1.6.3. Получение отверстий в полимерных композитных материалах | 98 |
| 1.6.4. Лазерные методы обработки композитных материалов | 104 |
| 1.6.5. Специфические особенности механической обработки деталей из ПКМ резанием | 108 |
| <i>Контрольные вопросы.....</i> | 112 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Глава 2 | |
| ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ | |
| ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОМПОЗИТНЫХ | |
| КОНСТРУКЦИЙ РТК | 113 |
| 2.1. Типовое применение и способы соединений композитных конструкций в ракетно-космической технике | 113 |
| 2.2. Особенности концевых соединений композитных конструкций | 125 |
| 2.2.1. Фланцевые законцовки композитных труб | 125 |
| 2.2.2. Сборка стыкуемых элементов композитных трубчатых конструкций с образованием разъёмных и неразъёмных соединений | 127 |
| 2.2.3. Сборка композитных конструкций с металлическими фланцами посредством образования всех известных соединений | 131 |
| <i>Контрольные вопросы.....</i> | 138 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Глава 3 | |
| ПОЛИМЕРНО-ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ | |
| МАТЕРИАЛЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ | |
| АППАРАТОВ И ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ | |
| ХАРАКТЕРИСТИКИ | 139 |
| 3.1. Однонаправленные полимерно-волокнистые композитные материалы..... | 139 |
| 3.1.1. Композитные материалы и их преимущества..... | 139 |
| 3.2. Непрерывные волокнистые наполнители ПКМ | 151 |
| 3.2.1. Намоточные наполнители из стеклянных волокон | 152 |
| 3.2.2. Арамидные волокна | 161 |
| 3.2.3. Углеродные волокна..... | 168 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3. Полимерные матрицы и термореактивные связующие для намоточных композитных материалов..... | 183 |
| 3.3.1. Требования к матрице волокнистых ПКМ | 183 |
| 3.3.2. Термопластичные матрицы. | 186 |
| 3.3.3. Термореактивные связующие для волокнистых ПКМ | 188 |
| 3.4. Структура и свойства полимерно-волокнистых композитных материалов | 198 |
| 3.4.1. Микромеханика однонаправленных ПКМ | 198 |
| 3.4.2. Упрочнение однонаправленных ПКМ непрерывными волокнами | 203 |
| 3.4.3. Потребное удлинение матрицы при растяжении волокнистого ортотропного ПКМ | 213 |
| <i>Контрольные вопросы.....</i> | 224 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Глава 4 | |
| УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ..... | 225 |
| 4.1. Состав, свойства и область применения углерод-углеродных композитных материалов | 225 |
| 4.1.1. Общая характеристика и область применения УУКМ | 225 |
| 4.1.2. Технологические этапы изготовления деталей из УУКМ | 227 |
| <i>Контрольные вопросы.....</i> | 239 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Глава 5 | |
| ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ ОБОЛОЧЕК СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ | 240 |
| 5.1. Принципы проектирования равнонапряженных композитных оболочек, образованных намоткой нитей | 240 |
| 5.1.1. Геометрия и уравнения равновесия оболочек сосудов давления. | 240 |
| 5.1.2. Проектирования равнонапряженных композитных оболочек на основе метода «сетчатого анализа»..... | 246 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.2. Тороидальные равнонапряженные композитные оболочки с расчетным меридианом | 256 |
| 5.2.1. Равнонапряженные тороидальные оболочки, изготовленные методом спиральной намотки нитей | 256 |
| 5.3.2. Конструктивно-технологические параметры композитных тороидальных оболочек | 262 |
| 5.3. Комбинированные тороидальные оболочки кругового сечения и криволинейные трубы с поперечной намоткой | 268 |
| 5.3.1. Конструктивно-массовый анализ комбинированных тороидальных оболочек кругового сечения | 268 |
| 5.3.2. Натяжение ленты при намотке комбинированных тороидальных оболочек | 277 |
| 5.4. Анализ комбинированных и композитных цилиндрических оболочек | 283 |
| 5.4.1. Комбинированные цилиндрические трубы со спиральной намоткой. | 283 |
| 5.4.2. Композитные цилиндрические оболочки (трубы)..... | 290 |
| 5.5. Конструктивно-массовый анализ комбинированных и композитных оболочек днищ цилиндрических баллонов..... | 295 |
| 5.5.1. Комбинированные днища цилиндрических баллонов..... | 295 |
| 5.5.2. Композитные оболочки днищ цилиндрических баллонов..... | 301 |
| 5.5.3. Днища баллонов, образованные намоткой нитей вдоль меридианов | 305 |
| 5.6. Композитные сферические оболочки, изготовленные методом зональной намотки односторонних ПКМ | 309 |
| 5.6.1. Общие сведения о сферических баллонах, применяемых в изделиях РКТ | 309 |
| 5.6.2. Определение толщины зонального слоя сферической оболочки с учетом ширины наматываемой ленты | 313 |
| 5.6.3. Напряжение в нитях на экваторе сферической оболочки | 318 |
| 5.7. Криволинейные композитные трубопроводы, изготовленные методом спиральной намотки нитей | 320 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.7.1. Конструктивно-технологический анализ криволинейных трубопроводов, полученных методом непрерывной намотки нитей | 320 |
| 5.7.2. Криволинейный трубопровод с постоянным углом армирования цилиндрического и изогнутого участков, изготовленный спиральной намоткой..... | 324 |
| 5.7.3. Криволинейный трубопровод, намотанный по линии постоянных скоростей | 329 |
| 5.7.4. Анализ углов геодезического отклонения нитей при намотке торoidalных оболочек кругового сечения и криволинейных труб | 331 |
| 5.7.5. Траекторно-угловые параметры намотки криволинейного трубопровода | 334 |
| <i>Контрольные вопросы</i> | 337 |
| Заключение | 338 |
| Библиографический список | 339 |

Предисловие

Данное издание по дисциплине «Технология производства композитных конструкций ракетно-космической техники» содержит основные сведения, необходимые для подготовки высококвалифицированных специалистов, рассчитано для студентов, магистрантов и аспирантов технических вузов, обучающихся по направлению «Ракетные комплексы и космонавтика» и специальностям «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов», «Проектирование авиационных и ракетных двигателей».

Самостоятельная работа студентов с книгой позволит сформировать у них интеллектуальные, личностные и профессиональные компетенции, необходимые для практической деятельности и выполнения трудовых функций при проектировании, разработке, создании технологий и оснащении производства деталей и сборочных единиц ракетно-космической и специальной техники из композитных материалов.

Материалы издания содержат сведения о конструктивно-технологических особенностях и основах производства композитных конструкций ракетно-космической техники; составе и свойствах композитных материалов; технологиях термостойких конструкций и теплозащитных покрытий летательных

аппаратов; технологии изготовления композитных конструкций методами намотки, контактно-вакуумным и автоклавным формированием; а также методах контроля качества и испытаний композитных конструкций.

При написании книги использованы опыт преподавания авторов на кафедре «Технология ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н. Э. Баумана, работы, выполненные в «Лаборатории композитных технологий» кафедры и кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ), обобщены достижения отечественных и зарубежных исследователей.

Издание является результатом многолетних исследований и конструкторско-технологических разработок по композитным изделиям, а также обобщения курсов лекций, читаемых авторами в МГТУ им. Н. Э. Баумана по дисциплинам «Космические аппараты и разгонные блоки», «Конструирование и производство изделий из композиционных материалов», «Твердотопливные ракетные двигатели» и в ПНИПУ «Проектирование авиационных и ракетных двигателей».