



## ООО «Издательство ЛАНЬ»

196105, Санкт-Петербург, проспект Юрия Гагарина, д. 1 лит. А  
Тел.: (812) 336-25-09  
www.lanbook.com, e-mail: lan@lanbook.ru  
ИНН 7801068765, КПП 780101001  
Расчетный счет: 40702810436060003981  
Филиал № 7806 Банка ВТБ (ПАО) г. Санкт-Петербург  
БИК: 044030707, Корр. счет: 30101810240300000707



## Мубаракшин Р. М. Инновационные технологии и оборудование для производства ответственных деталей газотурбинных двигателей.

Учебное пособие для вузов, 1-е изд.

ISBN 978-5-507-44430-4

Год выпуска 2022

Тираж 30 экз.

Формат 16,5×23,5 см

Переплет: твердый

Страниц 372

Учебное пособие знакомит с состоянием и тенденциями развития инновационных технологий и оборудования для производства ответственных деталей газотурбинных двигателей (ГТД). Рассмотрены технологии обработки дисков, валов, фасонных деталей сложной формы из высокопрочных, жаростойких сплавов на многоцелевых обрабатывающих центрах и протяжных станках. Рассмотрены методы сверления отверстий в лопатках. Даны методы аддитивных технологий, технологий лазерной резки, сварки, наплавки лопаток и блисков ГТД. Проведен анализ технологий шлифования лопаток, методов автоматизированного адаптивного шлифования и размерной полировки.

Даны методы измерения размеров, формы, расположения поверхностей, неразрушающего контроля качества, внутренних дефектов и способы автоматизированного контроля сборки узлов ГТД контактными и оптическими измерительными системами.

Приведены методология, инжиниринг технологического перевооружения производства, пути повышения эффективности технологических процессов на примере инвестиционных проектов, в реализации которых автор принимал участие.

Пособие может быть рекомендовано аспирантам, студентам старших курсов технических университетов, институтов и техникумов, обучающимся конструкторско-технологическим специальностям проектирования и производства ГТД. Пособие будет полезно инженерам конструкторско-технологических служб и заводских лабораторий.

### Рецензенты:

*А. А. ИНОЗЕМЦЕВ* — доктор технических наук, академик АН РФ, зав. кафедрой «Авиационные двигатели» ПНИПУ, управляющий директор — генеральный конструктор Научно-производственного комплекса ОДК-ПМ; *Ю. С. КОРОБОВ* — доктор технических наук, главный научный сотрудник, зав. лабораторией лазерной и плазменной обработки Института физики металлов им. М. Н. Михеева Уральского отделения РАН; *Ю. Д. ЩИЦЫН* — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Сварочное производство, метрология и технология материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; *В. А. МОРГУНОВ* — кандидат военных наук, доцент, полковник, начальник кафедры эксплуатации автобронетанковой техники Пермского военного института войск национальной гвардии.

### Введение

Разработка и производство газотурбинных двигателей (ГТД) является одним из научно-технических направлений, в котором участвуют только страны высокого технологического уровня. Это объясняется сложностью задач, лежащих на стыке материаловедения, машиностроительных переделов высокого уровня и информационных технологий. Повышение конкурентоспособности российской авиатехники и ее доли на мировом рынке является одним из приоритетов, заданных Стратегией национальной безопасности Российской Федерации. В рамках реализации Стратегии ключевой задачей является обеспечение внедрения и активного использования инновационных цифровых технологий при разработке, производстве и эксплуатации продукции.

Современный этап развития авиационной техники характеризуется ужесточением эксплуатационных параметров конструкции изделий, увеличением мощности, применением новейших материалов для повышения эффективности и увеличения ресурса изделия. Авиационная промышленность и авиадвигателестроение исторически являются лидерами применения инновационных технологий и новых материалов, а безопасность и высочайшие требования к качеству — важнейшие показатели производства газотурбинных двигателей и установок.

В турбореактивных двигателях ближайшей перспективы (2024–2026) будут существенно повышены параметры рабочего процесса и степень двухконтурности, а в их конструкции будут широко применяться композиционные материалы как в «холодной», так и в «горячей» частях двигателя [1, 2]. Керамические композиционные материалы (ККМ) находят применение для жаровой трубы камеры сгорания, лопаток соплового аппарата (СА) и рабочего колеса (РК) второй ступени ТВД и других ответственных высоконагруженных компонентов ГТД (см. цв. вкл., ил. 1).

Например, в семействе ТРДД LEAP-X компания CFM International впервые в мире для двигателей узкофюзеляжных самолетов применила лопатки РК и передний корпус вентилятора из полимерного композиционного материала.

Разработка новых технологий в авиадвигателестроении занимает не менее 10–15 лет, поэтому и за рубежом, и в России с конца 1990-х гг. активно ведутся работы по созданию научно-технического задела (НТЗ) для двигателей 2025–2030 гг. (шестого поколения). Современное двигателестроение характеризуется [3] применением прорывных технологий (рис. В1) и технических решений: высоконагруженные лопаточные ступени; широкое применение композиционных материалов, в том числе на основе керамической матрицы; лопатки турбины с системой охлаждения Super-cooling, обеспечивающие околостехиометрическую температуру газов на входе в турбину; блиски с полыми лопатками; алюминид титана (TiAl) для лопаток ТНД, изготовленных методами аддитивной технологии, и др.

В настоящее время оборудование устаревает с феноменальной скоростью, поэтому приоритетным направлением является высокотехнологичное оборудование, которое соответствует современным стандартам и имеет возможность интегрироваться в киберфизические системы, что будет способствовать облегчению мониторинга и повышению качества продукции. Применяя такое оборудование, производственные предприятия будут повышать скорость адаптации к новым требованиям, идти в ногу со временем и иметь конкурентные преимущества.

Применительно к производству авиационных газотурбинных двигателей и установок основными точками приложения «Индустрии 4.0» на начальном этапе являются: автоматизация всех технологических процессов производства и контроля; внедрение методов статистического анализа; создание системы учета всех стадий производства и контроля жизненного цикла изделия. Старые технологии на таком производстве оказываются неэффективными, неэкономичными, неэкологичными и требуют модернизации или замены. Создание новых технологий играет ключевую роль в обеспечении будущей конкурентоспособности авиационной техники.

## Оглавление

Введение ..... 3

Глава 1. Оборудование и технологии обработки фасонных деталей сложной формы из высокопрочных, жаростойких сплавов на многоцелевых обрабатывающих центрах ..... 8

Глава 2. Оборудование и технологии протягивания для производства дисков и лопаток газотурбинных двигателей и установок ..... 35

Глава 3. Аддитивные технологии для изготовления деталей и узлов газотурбинных двигателей ..... 50

Глава 4. Лазерные технологии аддитивной наплавки и сварки для изготовления и ремонта деталей и узлов газотурбинных двигателей ..... 79

Глава 5. Оборудование, технологии и методы шлифования лопаток газотурбинных двигателей ..... 101

Глава 6. Оборудование, технологии и методы сверления отверстий охлаждения в лопатках ..... 127

Глава 7. Адаптивное управление и автоматизация процессов обработки деталей с целью обеспечения требуемых эксплуатационных показателей ответственных узлов и машин в современном производстве ..... 171

Глава 8. Оборудование, технологии и методы автоматизированной адаптивной размерной полировки лопаток турбин ..... 183

Глава 9. Оборудование и технологии для контроля формы и размеров ..... 210

Глава 10. Оптические и лазерные измерительные системы (ИС) контроля ДСЕ. Применение ИС для контроля качества и обеспечения надежности процесса сборки ответственных изделий ..... 240

Глава 11. Оборудование и технологии для неразрушающего контроля качества поверхности, внутренних дефектов ..... 269

Глава 12. Методология технологического перевооружения производства и инжиниринга многовариантного перспективного технологического процесса ..... 310