

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АВИАКОНСТРУКЦИЙ

Е.И. Скворцова, В.К. Зольников, А.С. Ягодкин

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»

В статье представлен аналитический обзор структуры, эволюции и современного состояния высокопрочных материалов для авиаконструкций. Рассмотрены основные группы используемых материалов, включая металлические, полимерные и композиционные, а также современные тенденции перехода к наноструктурированным и интеллектуальным композитам. Особое внимание уделено технологическим аспектам повышения прочности, термостойкости, снижению массы конструкций и соблюдению экологических стандартов. Описаны перспективы внедрения отечественных материалов, реализуемые в рамках программ импортозамещения, а также задачи по энергоэффективности, ресурсосбережению и экологической безопасности авиационной отрасли. Анализируется влияние инновационных технических решений на надежность, долговечность, безопасность и снижение эксплуатационных затрат авиационных аппаратов.

Ключевые слова: высокопрочные материалы, авиаконструкции, композиционные материалы, металлические сплавы, полимеры для авиации, наноматериалы, энергоэффективность, импортозамещение, экологическая безопасность, российская авиационная промышленность, инновационные технологии.

ON-BOARD RADIOELECTRONIC EQUIPMENT

E.I. Skvortsova, V.K. Zolnikov, A.S. Yagodkin,

Voronezh State University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov

This article presents an analytical review of the structure, evolution, and current status of high-strength materials for aircraft structures. It examines the main groups of materials used, including metallic, polymer, and composite, as well as current trends toward nanostructured and intelligent composites. Particular attention is paid to the technological aspects of increasing strength

and heat resistance, reducing structural weight, and meeting environmental standards. It describes the prospects for the introduction of domestic materials, implemented through import substitution programs, as well as the challenges of energy efficiency, resource conservation, and environmental safety in the aviation industry. The impact of innovative technical solutions on the reliability, durability, safety, and reduced operating costs of aircraft is analyzed.

Keywords: высокопрочные материалы, авиаконструкции, композиционные материалы, металлические сплавы, полимеры для авиации, наноматериалы, энергоэффективность, импортозамещение, экологическая безопасность, российская авиационная промышленность, инновационные технологии.

Современная авиационная промышленность предъявляет чрезвычайно высокие требования к конструкционным материалам, используемым в создании летательных аппаратов. Высокопрочные материалы являются основой для создания безопасных, эффективных и экономически выгодных воздушных судов, способных выдерживать экстремальные нагрузки в условиях полета. В XXI веке развитие авиационного материаловедения характеризуется переходом от традиционных металлических сплавов к композиционным материалам нового поколения, обладающим уникальными свойствами прочности, легкости и долговечности.

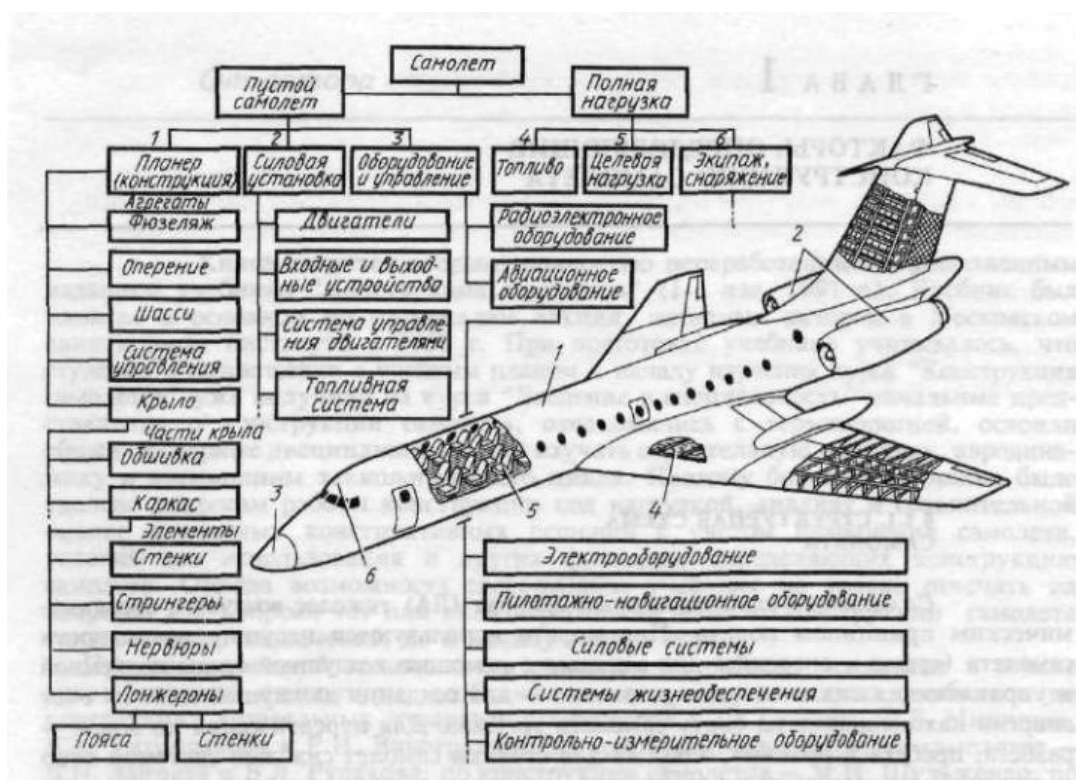


Рис. 1 Основные части самолета

Высокопрочные материалы в авиации должны обладать комплексом специфических характеристик, определяющих их пригодность для применения в авиационных конструкциях. Основным параметром является удельная прочность - отношение предела прочности материала к его плотности. Этот показатель критически важен для авиации, поскольку каждый дополнительный килограмм веса конструкции непосредственно влияет на расход топлива и эксплуатационные характеристики воздушного судна. Современные высокопрочные материалы должны также демонстрировать высокую усталостную прочность, поскольку авиационные конструкции подвергаются циклическим нагрузкам в течение всего срока эксплуатации.

Важнейшими характеристиками авиационных материалов являются сопротивление ударным воздействиям, коррозионная стойкость и стабильность свойств в широком диапазоне температур. Авиационные конструкции работают в условиях резких перепадов температур - от отрицательных значений на высоте крейсерского полета до высоких температур в зонах двигателей. Материалы должны сохранять свои прочностные характеристики при температурах от минус 60°C до плюс 200°C для планера и до 1600°C для деталей двигателей. Дополнительно требуется устойчивость к воздействию авиационного топлива, гидравлических жидкостей и других эксплуатационных сред.

Композиционные материалы на основе углеродного волокна представляют собой наиболее перспективный класс высокопрочных материалов для авиационных применений. Углепластики состоят из углеродных волокон диаметром 5-10 микрон, объединенных полимерной матрицей на основе эпоксидных, полиимидных или других термореактивных смол. Предел прочности на растяжение современных углеродных волокон достигает 7000 МПа, что в 3-4 раза превышает прочность высококачественных сталей при плотности в 4-5 раз меньше. Модуль упругости углеродного волокна составляет 200-800 ГПа, что обеспечивает высокую жесткость конструкций при минимальной массе.

Особенностью углепластиков является их анизотропия свойств - максимальная прочность достигается в направлении ориентации волокон. Это позволяет создавать оптимальные конструкции, в которых волокна ориентированы в направлениях основных силовых потоков. Современные углепластики демонстрируют удельную прочность 2000-3000 МПа/(г/см³), что в 10-15 раз превышает показатели алюминиевых сплавов. Дополнительными

преимуществами углепластиков являются низкий коэффициент температурного расширения, высокая усталостная прочность и способность гасить вибрации, что снижает уровень шума и повышает комфорт пассажиров.

Российская промышленность достигла значительных успехов в создании углепластиков авиационного качества. НИИГрафит и другие предприятия Росатома освоили производство углеродных волокон различных марок с характеристиками, соответствующими лучшим мировым образцам. В 2025 году объем производства композитных материалов для авиации в России увеличился до 385 тонн, что обеспечивает потребности отечественного авиастроения в высокопрочных материалах. Крыло самолета МС-21 стало первым в мире крылом пассажирского лайнера, полностью изготовленным из российского углепластика.



Рис. 2 Часть крыла, изготавливаемая из углепластика

Стеклопластики представляют более доступную альтернативу углепластикам для менее нагруженных элементов авиационных конструкций. Стекланные волокна обладают пределом прочности на растяжение 3000-4000 МПа при значительно более низкой стоимости по сравнению с углеродными волокнами.



Рис. 3 Применение стеклопластика в обтекателях

Модуль упругости стекловолокна составляет 70-85 ГПа, что меньше, чем у углеродного волокна, но достаточно для многих авиационных применений. Стеклопластики широко используются для изготовления обтекателей, элементов интерьера, вспомогательных конструкций и деталей, не испытывающих критических нагрузок.

Базальтовые волокна представляют перспективное направление развития композиционных материалов благодаря сочетанию хороших механических свойств с экологической безопасностью и доступностью сырья. Базальтовые волокна получают из природного базальта путем плавления и вытягивания в тонкие нити. Предел прочности базальтового волокна достигает 4000 МПа при модуле упругости 100 ГПа. Базальтопластики обладают повышенной термостойкостью по сравнению со стеклопластиковыми и могут применяться при температурах до 300°C. В российской авиации базальтовые композиты используются для создания теплозащитных экранов, элементов двигательных отсеков и других термонагруженных деталей.

Арамидные волокна, известные под торговыми марками Kevlar и Nomex, обладают уникальным сочетанием высокой прочности на растяжение с исключительной ударной вязкостью. Предел прочности арамидных волокон составляет 3000-4000 МПа при плотности 1,4-1,5 г/см³, что обеспечивает высокую удельную прочность. Особенностью арамидных композитов является их способность поглощать энергию удара без катастрофического разрушения.

Эти материалы применяются в авиации для изготовления защитных панелей, элементов, подверженных ударным воздействиям, и в гибридных композитах в сочетании с углеродными волокнами.

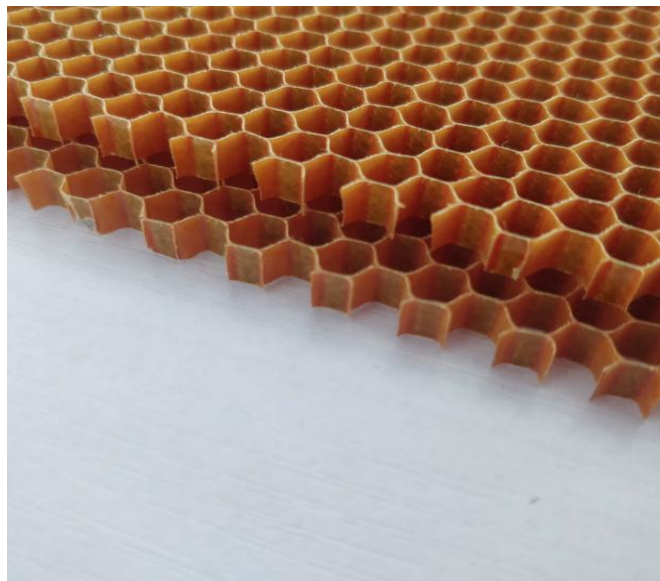


Рис. 4 Применение арамидных волокон

Металломатричные композиты представляют специальный класс высокопрочных материалов, в которых металлическая матрица армирована высокопрочными волокнами или частицами. Наибольшее применение в авиации получили композиты на основе алюминиевых сплавов, армированных углеродными или борными волокнами, а также титановые композиты с волокнами карбида кремния. Металломатричные композиты сочетают высокие механические свойства композитов с технологичностью металлов - они могут обрабатываться традиционными методами механической обработки, сварки и пайки.

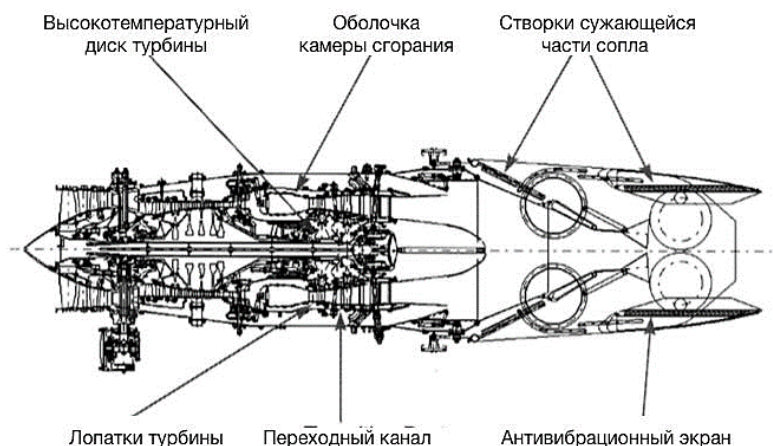


Рис.5 Применение металломатричных композитов в авиационном двигателе

Алюминиевые металломатричные композиты характеризуются удельной прочностью, достигающей $1000 \text{ МПа}/(\text{г}/\text{см}^3)$, и значительно превосходят традиционные алюминиевые сплавы по модулю упругости. Титановые металломатричные композиты отличаются выдающейся жаропрочностью и устойчивостью к коррозионному воздействию, что обуславливает их критическую важность для компонентов авиационных двигателей и элементов конструкции, эксплуатируемых в условиях повышенных температур. Отечественные производственные предприятия успешно внедрили технологии изготовления металломатричных композитов для силовых установок авиационной техники следующего поколения, что способствует увеличению эксплуатационной эффективности двигателей при одновременном сокращении их массовых характеристик.

Керамические композиционные материалы предоставляют уникальные возможности для разработки и производства конструктивных элементов, функционирующих в условиях экстремально высоких температурных режимов. Керамические матрицы на основе карбида кремния, нитрида кремния или оксида алюминия, армированные керамическими волокнами, способны выдерживать температуры до 1600°C при сохранении высоких механических свойств. Эти материалы применяются в наиболее теплонагруженных элементах авиационных двигателей - турбинных лопатках, камерах сгорания и соплах. Использование керамических композитов позволяет повысить температуру рабочего процесса в двигателе на $200\text{-}300^\circ\text{C}$, что обеспечивает увеличение термодинамической эффективности и снижение удельного расхода топлива на 8-12%.

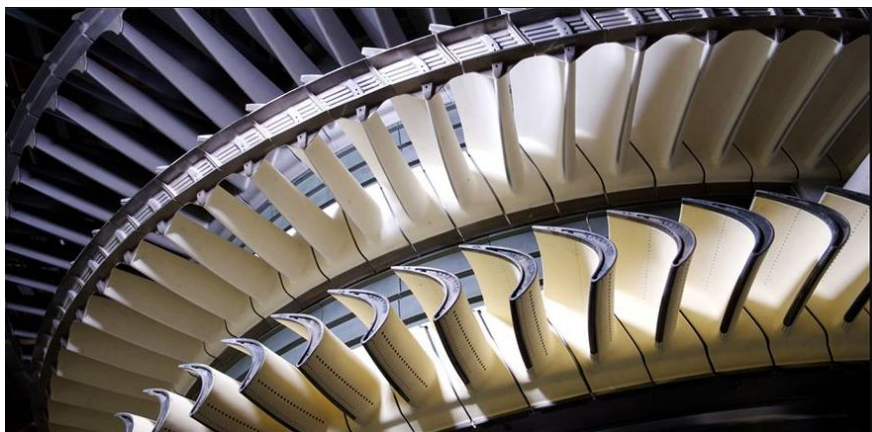


Рис. 6 Применение керамических композитных материалов в турбинах лопаток

Наноматериалы представляют передовое направление развития высокопрочных авиационных материалов. Углеродные нанотрубки обладают теоретической прочностью до 100 ГПа при плотности 1,3 г/см³, что в десятки раз превышает характеристики существующих материалов. Графен, представляющий собой однослойную структуру углерода, демонстрирует прочность до 130 ГПа и уникальные электрические свойства. Наноматериалы могут использоваться как самостоятельно для создания сверхлегких и сверхпрочных конструкций, так и в качестве добавок к традиционным композитам для улучшения их свойств.

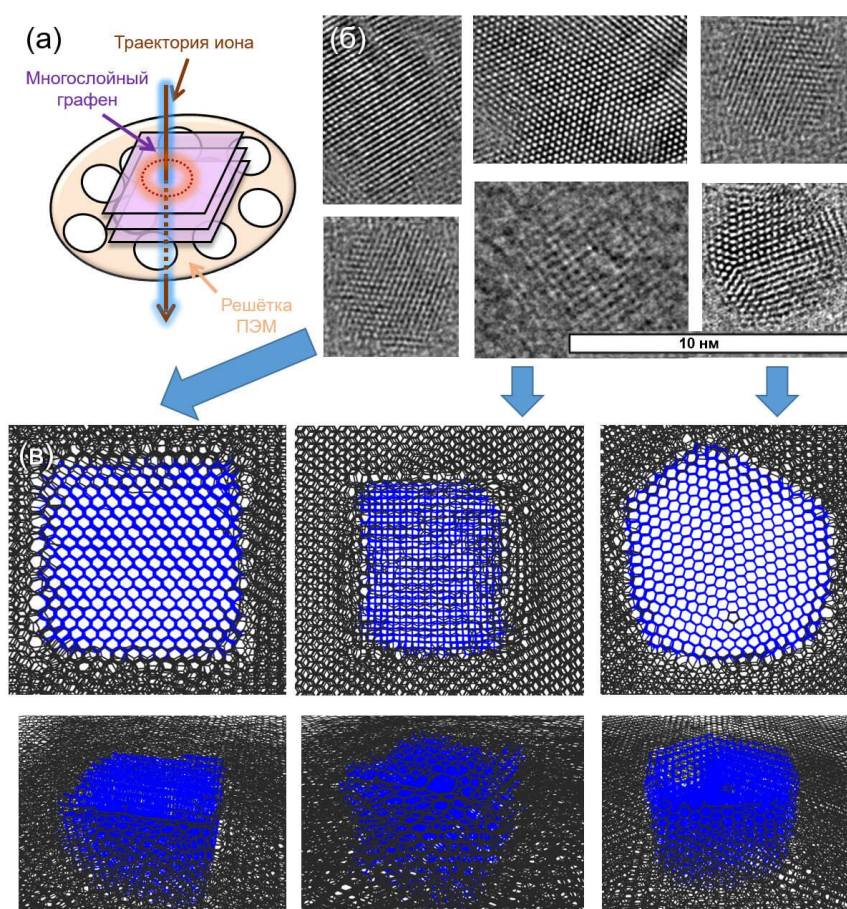


Рис. 7. Микроскопическое изображение графена и углеродных нанотрубок

Применение высокопрочных материалов в различных элементах авиационных конструкций определяется спецификой нагружения и условий эксплуатации. Крылья современных самолетов изготавливаются

преимущественно из углепластиков, что обеспечивает снижение массы на 20-30% по сравнению с алюминиевыми конструкциями. Композитное крыло обладает повышенной усталостной прочностью и позволяет создавать оптимальные аэродинамические формы благодаря технологичности формования. Фюзеляж также все чаще изготавливается из композиционных материалов, особенно в зонах максимальных нагрузок и в местах крепления крыла.

Элементы шасси требуют исключительно высокой прочности и ударной вязкости, поэтому для их изготовления применяются высокопрочные стали, титановые сплавы и металломатричные композиты. Стойки шасси должны выдерживать многократные ударные нагрузки при посадке и обеспечивать безопасность воздушного судна в аварийных ситуациях. Современные материалы для шасси обладают пределом прочности 1200-1800 МПа при высокой вязкости разрушения.

Авиационные двигатели предъявляют наиболее жесткие требования к материалам из-за экстремальных условий эксплуатации. Лопатки компрессора изготавливаются из титановых сплавов или металломатричных композитов, обеспечивающих работоспособность при температурах до 600°C. Турбинные лопатки работают при температурах 1200-1600°C и изготавливаются из жаропрочных никелевых суперсплавов с керамическими теплозащитными покрытиями или из керамических композиционных материалов. Камеры сгорания также используют керамические композиты или жаропрочные металлы с развитыми системами охлаждения.

Перспективы развития высокопрочных авиационных материалов связаны с созданием многофункциональных композитов, интегрирующих конструкционные и функциональные свойства. Инновационные "умные" материалы оснащаются встроенными датчиками, которые позволяют им отслеживать свое техническое состояние в реальном времени и оперативно передавать данные в системы мониторинга самолета. Самовосстанавливающиеся композиты обладают способностью автоматически устранять микрповреждения, что значительно продлевает срок службы авиационных конструкций и повышает их надежность. Адаптивные материалы способны менять свои свойства в ответ на изменяющиеся условия эксплуатации, оптимизируя параметры конструкции для различных режимов полета и обеспечивая максимальную эффективность работы воздушного судна.

Биомиметические материалы, разработанные с учетом принципов природных структур, предоставляют революционные возможности для совершенствования авиационных конструкций. Иерархические структуры, воспроизводящие организацию костной ткани или древесных волокон, обеспечивают оптимальное перераспределение механических напряжений и достигают максимальной удельной прочности при критически важном снижении массы конструкции. Функционально-градиентные материалы с постепенно изменяющимися физико-механическими свойствами позволяют создавать авиационные элементы, специально адаптированные под конкретные эксплуатационные нагрузки и условия работы.

Биокomпозиты на основе натуральных волокон и биоразлагаемых матриц могут применяться в неответственных элементах конструкции, снижая экологическое воздействие авиации. Рециклируемые термопластичные композиты обеспечивают возможность повторного использования материалов в конце жизненного цикла изделий. Снижение массы конструкций за счет применения высокопрочных материалов напрямую влияет на сокращение расхода топлива и выбросов парниковых газов.



Рис.8. Сборка самолета из различных конструктивных материалов на Воронежском авиационном заводе

Список литературы

1. Композиционные материалы для авиастроения / Под ред. Коваленко В.П. – М.: Наука, 1992
2. Левин В.М. Теория пластичности и прочности. – М.: Наука, 1990.
3. Ильин Е.А. Металлические и композиционные материалы для авиастроения. – СПб: БХВ-Петербург, 2015.
4. И.В. Леонтьев, А.В. Королёв, "Материаловедение конструкционных материалов для авиации". — М.: Машиностроение, 2015.
5. И.С. Томашевский, "Современные композиты в авиационной промышленности". — СПб.: Политехника, 2021.
6. А.А. Фомин, Е.В. Казанцев, "Титановые и тугоплавкие сплавы в авиастроении". — М.: УрО РАН, 2019.

References

1. Lenshin A.V., Tikhomirov N.M., Popov S.A. Onboard Radio-Electronic Systems. Design Basics // Aviation Bulletin. 2023. Vol. 14, No. 2. pp. 54–68.
2. Kucheryavy A.A. Avionics: A Tutorial. Moscow: EBS Lan, 2024
3. Zemlyany E.S. Fundamentals of Aircraft Onboard Radio-Electronic Equipment Software Development: A Tutorial. Moscow, 2022.
4. I. V. Leontiev, A. V. Korolev, "Materials Science of Structural Materials for Aviation". Moscow: Mashinostroenie, 2015.
5. I. S. Tomashevsky, "Modern Composites in the Aviation Industry". St. Petersburg: Polytechnic, 2021.
6. A. A. Fomin, E. V. Kazantsev, "Titanium and Refractory Alloys in Aircraft Construction". Moscow: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2019.