

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 678.8

Рекомендации по созданию авиационного композиционного материала на основе углеродного волокна

Е.В. Малая, Д.С. Лебединская

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

Рассматривается возможность создания авиационного композиционного материала с высокими прочностными характеристиками и показателями долговечности. Целью работы являлась разработка рекомендаций по применению композиционного материала углепластика на основе углеродного волокна и неорганических соединений. Описаны технологии получения углепластика на основе различных связующих. В результате исследования были выявлены достоинства и недостатки исследованных технологий, выработаны рекомендации получения углепластика на основе неорганических соединений.

Ключевые слова: авиационный композиционный материал, углеродное волокно, неорганические соединения, воздушное судно

Для цитирования. Малая Е.В., Лебединская Д.С. Рекомендации по созданию авиационного композиционного материала на основе углеродного волокна. *Молодой исследователь Дона*. 2024;9(6):16–21.

Recommendations for the Development of Aviation Composite Material Based on Carbon Fiber

Elena V. Malaya, Diana S. Lebedinskaya

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

The article considers the possibility of creating aviation composite material with high strength and durability characteristics. The aim of the work is to develop recommendations for the application of composite material carbon plastic based on carbon fiber and inorganic compounds. Technologies of obtaining carbon fiber reinforced plastic on the basis of various binders are described. The study has identified the advantages and disadvantages of these technologies, and recommendations have been developed for the production of carbon fibers using inorganic compounds.

Keywords: aviation composite material, carbon fiber, inorganic compounds, aircraft

For citation. Malaya EV, Lebedinskaya DS. Recommendations for the Development of Aviation Composite Material Based on Carbon Fiber. *Young Researcher of Don*. 2024;9(6):16–21.

Введение. Конструкции современных воздушных судов постоянно модернизируются. Это требует от конструкторов использования новых материалов, которые помогут достичь малого веса летательного аппарата и высокой прочности конструкции:

- углеродные волокна: лёгкие материалы, обладающие высокой прочностью и жёсткостью, которые нашли широкое применение в конструкции фюзеляжей, крыльев и других критически важных узлах самолёта;
- стекловолокно: материал, который также используется в авиации, однако реже, чем углеродные волокна. Оно дешевле и отличается достаточной прочностью, но имеет больший вес;
- арамидные волокна: материалы, обладающие высокой прочностью на разрыв и устойчивостью к ударам. Часто используются в броневых материалах и некоторых частях конструкции летательных аппаратов;
- композиты на основе термопластов: это материалы, которые могут быть переработаны и повторно использованы, что делает их более экологически чистыми. Они могут использоваться в различных частях конструкции;

- сэндвич-панели: сочетание лёгкого сердечника (например, из пенопласта или алюминия) и внешних слоёв из углеродного или стекловолокна. Эти панели обеспечивают высокую жёсткость при низком весе;
- металлические композиты: в некоторых случаях используются композиты на основе металлов, которые обеспечивают определённые преимущества в прочности и весе.

Связующие на основе эпоксидной смолы в настоящее время являются неотъемлемым компонентом полимерных композитов. Впервые технология производства эпоксидных смол была открыта русским химиком Николаем Прилежаевым в 1909 году. В 1930-х годах технологии производства эпоксидных смол стремительно развивались, и они стали широко использоваться в производстве композитных материалов [1].

Открытие и последующее развитие технологии углеродного волокна также сыграло важную роль в разработке композитных материалов. Углеродное волокно даже легче и прочнее стекловолокна. Первым инженером, получившим углеродное волокно, был Томас Эдисон в 1880 году. В качестве элемента ламп накаливания он использовал углеродные нити, полученные при нагревании из растительных волокон. Позже их заменили на более надёжные вольфрамовые. Об изобретении забыли, но оно стало прототипом современного углеродного волокна. В разработке углеродного волокна достигнут в настоящее время большой прогресс — значения прочности на растяжение могут достигать 12 ГПа, а лучший модуль отбора проб может достигать 1000 Гпа [1].

С переходом от штамповки на процесс литья стало возможным формирование более сложных конструкций. Эти конструкции могли преодолеть физические ограничения, такие как сопротивление воздуха, силу тяжести, перепады температур, механические нагрузки, шумовые ограничения, связанные с полётами воздушных судов [2]. Однако при этом возникли и сложности: изготовление композиционных материалов в виде литья требовало значительных усилий и включало в себя множество ручных операций, а время для отверждения материала приходилось подбирать опытным путём [2]. Позднее композиционные материалы многократно дорабатывались на соответствие требований стандартов по авиационным материалам.

Металлические сплавы, используемые в самолётах, имеют множество преимуществ, таких как высокая прочность, коррозионная стойкость и хорошая обрабатываемость. Однако им присущи и некоторые недостатки: значительный вес, усталость материала, коррозия, температурные ограничения и сложность обработки. Несмотря на это, металлические сплавы остаются основными материалами в авиационной промышленности, вопреки своим недостаткам.

В наши дни композиционные материалы составляют до 50 % веса широкофюзеляжных самолётов. Boeing стал пионером в этой области, достигнув этого рубежа в 2011 году с выпуском своего дальнемагистрального самолёта Boeing 787, который успешно прошёл процедуру сертификации. В то время как у конкурирующего Airbus A380 доля композитов не превышала 25%, это достижение было поистине значимым. Через четыре года после успеха Boeing, Airbus представил свою дальнемагистральную модель A350, где доля композитов достигла впечатляющих 53 %. В конструкции этих самолётов фюзеляж, хвостовое оперение и некоторые элементы крыльев и элеронов выполнены из композитных панелей, состоящих из углеродного волокна и эпоксидной смолы [2]. Это позволило значительно снизить вес, улучшить топливную эффективность и повысить коррозионную стойкость, по сравнению с традиционными материалами, такими как алюминий. На отечественном узкофюзеляжном ближнемагистральном пассажирском самолёте Sukhoi Superjet 100 используется значительное число композиционных материалов. Они составляют около 12 % от общего веса самолёта [3]. Основными областями применения композитов являются крылья, хвостовое оперение и фюзеляж.

Цель данного исследования — рассмотреть возможности применения авиационного композиционного материала на основе углеродного волокна.

Основная часть

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе эпоксидных матриц относятся к числу материалов, применяемых в производстве элементов внешнего контура современных летательных аппаратов, как показано на рис. 1 [4]. Композиты уже сегодня можно смело называть стратегическими материалами. Заслуживают они этого звания по ряду преимуществ. Во-первых, им присущи лёгкость и высокая прочность. Композиционные материалы, например, как углеродные волокна и стекловолокна обладают высокой прочностью при маленьком весе. Это делает их идеальными для применения в аэрокосмической, автомобильной, судостроительной и строительной отраслях, где важно уменьшение массы и усиление конструкций. Во-вторых, хорошая коррозионная стойкость и способность противостоять воздействию окружающей среды. Композиционные материалы часто обладают высокой устойчивостью к химическим веществам, влаге и температурным перепадам, что продлевает срок службы изделий и снижает затраты на обслуживание. В-третьих, снижение радиозаметности, что является одним из важнейших пунктов в авиационной военной промышленности, поскольку углеродные волокна не отражают электромагнитные сигналы — пропускают их через себя или поглощают [5]. В среднем срок службы авиационных композиционных материалов составляет от 15 до 30 лет. Для углеродного волокна

эта цифра составляет от 20 до 30 лет, для стеклянного волокна — 15–25 лет, в зависимости от условий эксплуатации. В-третьих, важны экологические преимущества. Многие композиты могут быть переработаны или имеют меньший экологический след по сравнению с традиционными материалами. Это становится всё более актуальным в условиях глобальных экологических проблем.



Рис. 1. Консоль крыла самолёта МС-21 на основе композиционных материалов [6]

В авиастроении используются следующие композиционные материалы:

- арамидные ткани — используется для создания нижней части фюзеляжа и пилонов двигателя;
- углеткани — применяются для изготовления рулевых поверхностей, дверей, капота авиадвигателя;
- стеклоткани — находят применение при производстве менее нагруженных элементов конструкции, таких как приёмники воздушного давления, воздухозаборник вспомогательной силовой установки (ВСУ). Распределение различных материалов показано на рис. 2 [7].



Рис. 2. Распределение материала в конструкции планера [8]

Наиболее быстрорастущим сегментом являются ПКМ на основе углеродных волокнистых наполнителей, используемых в качестве армирующих элементов. Необходимость разработки углепластиков с улучшенными характеристиками жёсткости и температурной размерной стабильности при сохранении высоких показателей прочности диктуется потребностями таких объектов новой техники, которые по условиям эксплуатации должны сохранить стабильность геометрических размеров при больших знакопеременных силовых и температурных нагрузках.

Углеродное волокно (УВ) — это высокопрочный материал, в основном состоящий из тонких волокон углерода (рис. 3). Он обладает множеством уникальных свойств, которые обеспечивают их незаменимость при разработке современных ПКМ и конструкций на их основе. В работе И. Н. Гуляева и К. А. Павловского выделяются следующие свойства:

- высокие удельные характеристики прочности и модуля упругости при растяжении;
- высокая термостойкость в инертных средах или в вакууме при температуре до 3 000°C, а на воздухе до 550°C;
- удельное электрическое сопротивление от $0,02 \times 10^6$ до $1,0 \times 10^9$ Ом \times м;
- большая активная поверхность (до 2 500 м²/г) и сорбционная способность;
- химическая стойкость к концентрированным кислотам, щелочам и растворителям, устойчивость к действию света и проникающей радиации;
- биостойкость и биоинертность, жаростойкость и трудногорючесть [9].



Рис. 3. Материал из углеродного волокна [10]

Е. В. Атясова пишет: «Углеродные волокна на 85–99 % состоят из углерода. Они получают путём термической обработки органических волокон, таких как вискозное кордное волокно, полиакрилонитрильное волокно и нефтяной пек, а также иногда из каменного угля, лигнина и феноло-формальдегидных волокон. Волокна, которые будут использованы для производства углеродных волокон, не должны расплавляться при термической обработке и должны обеспечивать высокое коксовое число, что является показателем выхода нелетучего остатка (углерода) при нагревании» [11].

В зависимости от температуры обработки и содержания углерода, углеволокно делится на частично карбонизированное (до 900 °С; 85–90 % С), карбонизированное (900–1 500 °С; 95–99 % С) и графитизированное (1 500–3 000 °С; более 99 % С) [12].

Процесс создания углеродного волокна начинается с подготовки основного материала — волокон. Полиакрилонитрильные (ПАН), растительные или полиэфирные волокна формируются в тонкие нити. Затем они подвергаются термоокислительной обработке на воздухе при температуре порядка 220–300 °С в течение суток, чтобы обеспечить стабильную структуру, которая будет препятствовать разрушению волокон в ходе последующей карбонизации. На стадии низкотемпературной обработки — карбонизации волокна в интервале температур от 250 до 300 °С — происходит частичное разрушение волокон и снижение их прочности и модуля упругости. Однако при повышении температуры выше 450–500 °С показатели указанных свойств начинают возрастать, увеличивается плотность волокон. Продолжительность этих процессов у разных видов волокон может варьироваться: для волокон из полиакрилонитрила этот временной промежуток составляет 0,5–4,0 часов, для вискозного кордного волокна процесс занимает 3–200 часов [12].

На третьем этапе процесса, который включает высокотемпературное (вплоть до 3 000 °С), воздействие длится всего несколько минут, происходит укрепление прочности УВ. В этот период формируется углеродная структура, которая предоставляет волокнам их характерные механические качества. Также происходит уменьшение удельной поверхности материала, что впоследствии способствует снижению его способности поглощать воду.

После карбонизации волокна могут подвергаться дополнительной обработке, например, могут быть покрыты специальными веществами для улучшения сцепления разных поверхностей с матрицами в композитах.

Рассмотрим композиционный материал на основе углеродного волокна и органических соединений. Получение углеродного волокна рассмотрено выше. Следующим шагом является выбор матрицы. Для углепластиков обычно используется термореактивные (эпоксидные, полиэфирные) или термопластичные полимеры. Эпоксидные смолы наиболее популярны благодаря их хорошей адгезии, прочности и устойчивости к воздействию химических веществ. Третьим этапом следует формирование композита. Различают три вида его формирования: ламинирование — углеродные волокна укладываются в форму и пропитываются полимерной матрицей. Затем материал отверждается при комнатной температуре или с использованием тепла; вакуумное формирование — вакуум используется для удаления воздуха из формы, что способствует лучшему проникновению матрицы в волокна; инъекционное формование — полимерная матрица под давлением вводится в форму с углеродными волокнами, что позволяет создать однородный композит. Далее идёт этап отверждения, который может быть выполнен при комнатной температуре или с использованием тепла и давления, в зависимости от типа матрицы. Если имеется необходимость, то углепластик подвергается дополнительной обработке, такой как шлифовка, резка или покрытие защитными слоями, чтобы улучшить его эксплуатационные характеристики и внешний вид.

Несмотря на многочисленные преимущества углепластиков, таких как высокая прочность, лёгкость и устойчивость к коррозии, технология получения композиционного материала углепластика на основе органических соединений имеет ряд недостатков: они могут воспламеняться (диапазон рабочих температур имеет верхний предел в районе 450 °С), относятся к термореактивным материалам. Поэтому их трудно перерабатывать, что создаёт проблемы с утилизацией и увеличивает количество отходов. Хотя углепластики и обладают высокой прочностью на растяжение, их ударная прочность может быть ниже. Помимо этого, влажность снижает прочность и долговечность авиационного композиционного материала. Авторами статьи предложено рассмотреть возможность создания авиационного композиционного материала углепластика на основе неорганических соединений. На первом этапе идёт выбор типа углеродного волокна и подходящих смол. Выяснилось, что углепластики, которые армированы углеродной тканью и включают в себя алюмофосфатные, алюмоборфосфатные и алюмохромфосфатные связующие, обладают хорошими прочностными и жёсткостными характеристиками. Авторы рекомендуют использовать углепластик на основе алюмохромфосфата, так как он обладает наилучшими показателями прочности и жёсткости, что позволяет использовать его в экстремальных условиях, включая недолгое воздействие открытого огня. Эти материалы способны выдерживать температуры выше 500°С, а также обеспечивать негорючесть. На втором этапе идёт подготовка компонентов. Заключается она в предварительной обработке специальными покрытиями поверхности, чтобы улучшить адгезию к фосфатной матрице. Для достижения желаемых свойств фосфатные соединения смешиваются с другими добавками, такими как пластификаторы и катализаторы. Третий шаг — процесс композирования. Углеродные волокна пропитываются фосфатной смолой. Это можно сделать двумя методами — вакуумной инфузией и ручным нанесением. Углеродное волокно, пропитанное смолой, укладывается для создания многослойной структуры. Чтобы добиться желаемых механических характеристик, возможно изменение ориентации волокон. Далее следуют процессы высыхания и отверждения. После укладки слоёв материал предварительно сушат для удаления лишней влаги и обеспечения сильного сцепления между слоями. Отверждение может осуществляться как при высокой температуре, так и при высоком давлении. По завершению процесса отверждения материал приобретает требуемые механические свойства, например, прочность, жёсткость и долговечность. Этот этап является ключевым для гарантирования надёжности конечного продукта, особенно при работе в условиях, где присутствуют высокие нагрузки и агрессивные условия. В процессе отверждения также могут происходить химические реакции, влияющие на конечные свойства материала. Например, некоторые фосфатные смолы могут создавать прочные ковалентные связи, что существенно повышает их химическую стойкость и устойчивость к температурным изменениям. Также необходимо помнить, что некорректно выбранные параметры закрепления могут привести к недостаточному затвердеванию, что отрицательно скажется на эксплуатационных характеристиках. Таким образом, контроль температуры и давления, а также соблюдение времени отверждения — это основополагающие моменты в процессе производства. Завершающим этапом является обработка и финишная отделка материала. Для достижения необходимых размеров и формы углепластик должен быть обрезан и отшлифован. Готовые образцы проходят испытания на механические свойства, термостойкость и химическую стойкость.

Несмотря на большинство плюсов, а именно, хорошие температурные показатели, показатели жёсткости и прочности, лёгкость утилизации, в отличие от традиционных пластиков, которые загрязняют окружающую среду при утилизации, эти композиты разлагаются до компонентов глины и фосфатных удобрений, композиционные материалы на основе углеродного волокна и неорганических соединений имеют и ряд недостатков. Во-первых, высокая цена. Производство композиционного материала на основе фосфатных связующих может являться дорогостоящим из-за стоимости компонентов. Во-вторых, незначительное разрушение под действием UV-излучения. Некоторые фосфатные связующие, в нашем случае алюмохромфосфат, может быть чувствителен к ультрафиолетовому излучению, что может привести к ухудшению механических свойств со временем, если материал никак не защищён. В-третьих, ограниченная термостойкость. Углепластик на основе алюмохромфосфатных связующих устойчив к высоким температурам (свыше 500 градусов Цельсия), но он имеет ограничения по температуре эксплуатации, особенно, если связующее начинает терять свои свойства при высоких температурах. В-четвёртых, материал обладает недостаточной влагостойкостью.

Заключение. Суть вышеизложенного сводится к рекомендациям использования в авиационной промышленности углепластика на основе неорганических соединений. Это аргументируется тем, что материал устойчив к перепадам температур и химическим воздействиям, обладает превосходными прочностными характеристиками: упругость, прочность на сжатие, сдвиг и усталостная прочность. Это делает их привлекательными для использования в аэрокосмической и других высокотехнологичных отраслях промышленности. Оптимизация перечисленных выше свойств позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики композитных материалов, что повышает эффективность компонентов летательных аппаратов.

Список литературы

1. Сенатов Ф., Комаров И., Кузнецов А. *От кирпичей до наноматериалов: эволюция композитов*. Postnauka.org URL: <https://postnauka.org/longreads/99577> (дата обращения: 17.10.2024).
2. *Авиация: полимеры и композиты для высоких полётов*. Plastinfo.ru. URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/798/> (дата обращения: 17.10.2024).
3. *Правительство на производство самолётов Ту-214 выделит 83,6 млрд руб.* Plastinfo.ru. URL: https://plastinfo.ru/information/news/51656_23.06.2023/ (дата обращения: 17.10.2024).
4. Старцев В.О., Валева Е.О., Варданян А.М., Нечаев А.А. Оценка стабильности авиационных углепластиков к атмосферным осадкам. В: *сб. материалов V Всероссийской научно-технической конференции «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники»*. Москва: ФГУП «ВИАМ»; 2021. С. 60–72. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1353.pdf> (дата обращения 22.10.2024).
5. *«Карбоновые призраки»: углепластик скроет самолёты ВКС России от радаров*. Ria.ru. URL: <https://ria.ru/20170728/1499347429.html> (дата обращения 22.10.2024).
6. *На завод корпорации «Иркут» доставлена первая консоль композитного крыла самолёта МС-21*. Aviation Explorer. URL: <https://www.aex.ru/news/2016/1/19/148221/> (дата обращения: 24.10.2024).
7. Спирин М.С., Сененко В.С., Липатов А.С. Современные композиционные покрытия и материалы для аэрокосмических аппаратов. В: *сб. статей научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития современной науки» по направлению «Новые материалы и энергетика в ВС РФ»*. Анапа: Изд-во «Военный инновационный технополис ЭРА», 2022. С. 66–74.
8. Элементы хвостовой и носовой части крыла самолёта, агрегаты механизации крыла и оперения. URL: <https://compositescluster.ru/products/uglekompozitnye-materialy-i-izdeliya/elementy-khvorostovoy-i-nosovoy-chasti-kryla-samoleta-agregaty-mekhanizatsii-kryla-i-opereniya/> (дата обращения: 24.10.2024).
9. Гуляев И.Н., Павловский К.А. Высокомодульные углепластики для изделий гражданской авиационной техники (обзор). *Труды ВИАМ*. 2023;3(121):95–106. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.10.2024).
10. *JDD-СВ*. Кросс-Контакт. URL: <https://kross-kontakt.ru/zashchitnye-opletki/dopolnitelnye-zashchitnye-izdeliya/jdd-cb> (дата обращения: 24.10.2024).
11. Атясова Е.В., Блазнов А.Н. Гибридные полимерные композиционные материалы. Часть 1. Состав и свойства. *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2019;11:23–31. <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2019-0-11-23-31>
12. *Полимерный композиционный материал углепластик*. B argue.ru URL: <https://www.barque.ru/shipbuilding/1991/polymer-composite-material-cfrp> (дата обращения: 24.10.2024).

Об авторах:

Диана Сергеевна Лебединская, студент кафедры техническая эксплуатация летательных аппаратов и наземного оборудования Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), daya85194@gmail.com

Елена Викторовна Малая, кандидат технических наук, доцент кафедры техническая эксплуатация летательных аппаратов и наземного оборудования Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), elvicma@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Diana S. Lebedinskaya, Student of the Department of Technical Operation of Aircraft and Ground Equipment, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), daya85194@gmail.com

Elena V. Malaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technical Operation of Aircraft and Ground Equipment, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), elvicma@mail.ru

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.