

Шестаков Игорь Александрович, к. т. н., доцент,
кафедра «Нанотехнологии и микросистемная техника»
ИжГТУ им. М.Т.Калашникова

Шергин Евгений Андреевич, студент
ИжГТУ им. М.Т.Калашникова

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК И КОНФИГУРАЦИЙ КРЫЛА БПЛА С ВНЕДРЕНИЕМ УНТ

Аннотация. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) за последние годы стали важной частью жизни людей. Практически самая важная неотъемлемая часть БПЛА – это крыло. От того, какое у крыла строение, какие у него форма и вес, зависит, как долго БПЛА может лететь, сколько грузов поднять, как быстро и плавно сменить путь, и сколько времени пробыть в воздухе. Обычно крылья делают из алюминия и других легких сплавов или из стекла и угля, смешанных с разными связующими. Но такие материалы уже почти не дают новых больших плюсов по прочности и массе. Сегодня для БПЛА надо, чтобы крыло стало легче, но не слабей, а еще лучше, чтобы оно летело дальше и было крепче. Для этого нужны новые материалы и свежие способы их создания. Один из лучших вариантов – использовать углеродные нанотрубки, которые очень малы, но очень прочны.

Ключевые слова: УНТ, крыло, образец.

Углеродные нанотрубки (УНТ) имеют очень хорошие свойства: они не ломаются под большим весом, хорошо держат форму, могут долго служить, пропускают ток и не боятся больших перепадов тепла. Но есть трудности – сложно сделать так, чтобы эти трубки легли равномерно по всему крылу, чтобы они не конфликтовали со всем остальным, и чтобы крыло при этом не меняло нужные формы для полета, не теряя скорость и выносливость.

Цель этой работы – дать четкий и полный разбор того, как нанотрубки изменяют крыло: влияют на его форму, крепость и вес, а еще показать, как лучше их положить в строение. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: провести обзор и систематизацию современных композитных материалов и способов интеграции углеродных нанотрубок в структуру авиационных конструкций; разработать конечно-элементные модели крыла БПЛА с различными схемами армирования углеродными нанотрубками; провести численный прочностной анализ крыльев с различным содержанием и распределением УНТ; сформулировать практические рекомендации по проектированию крыла БПЛА с использованием модифицированных нанотрубками композитов.

Объектом исследования является крыло беспилотного летательного аппарата самолётного типа, выполненное из полимерного композиционного материала, усиленного углеродными нанотрубками. Предметом исследования выступают аэродинамические и прочностные характеристики крыла БПЛА, а также схемы и параметры внедрения углеродных нанотрубок, влияющие на интегральные показатели эффективности конструкции.

1. Теоретические основы использования углеродных нанотрубок в авиационных конструкциях

1.1. Физико-механические свойства и классификация углеродных нанотрубок

Углеродные нанотрубки (УНТ) представляют собой аллотропную модификацию углерода, в которой атомы образуют цилиндрическую структуру диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной, достигающей микрометров и даже миллиметров. В зависимости от количества концентрических слоев различают однослойные (ОСУНТ) и многослойные (МСУНТ) нанотрубки. Их уникальные физико-механические свойства обусловлены прочностью sp^2 -гибридизированных связей между атомами углерода в гексагональной решетке графена, свернутого в цилиндр.



Механические свойства углеродных нанотрубок очень высоки. Их упругость (жесткость), которую ещё зовут модулем Юнга, равна примерно 1 ТПа. Это почти в пять раз больше, чем у стали. При этом масса или плотность нанотрубок почти в шесть раз меньше, чем у стали. Максимальная сила, которую трубки могут держать на разрыв, может быть 50–60 ГПа, что больше чем в десять раз превышает силу лучших сталей. Такое сочетание – когда материал крепкий, но лёгкий – даёт им особую прочность, если считать на единицу массы. Ещё углеродные нанотрубки очень жесткие. Их жесткость при сгибе такая же, как у алмаза. Если на такие трубки давить, они могут деформироваться, но не ломаются, а потом снова принимают начальную форму после снятия нагрузки.

Эти числа могут быть не совсем точными. На деле прочность и жесткость таких трубок сильно меняются от того, есть ли в них трещины или другие проблемы. Если в трубках есть пустые места, лишние атомы или другие ошибки, они становятся слабее на 20–30%. Также прочность в трубках с несколькими слоями обычно ниже, чем у трубок с одним слоем. Связи между разными слоями не всегда хорошие. Слои могут двигаться друг относительно друга, и труба становится менее прочной. Положение атомов в трубке также важно. Их расположение вдоль трубки может сильно изменить то, насколько она крепкая.

Углеродные нанотрубки имеют разную прочность в разных местах. Вдоль трубки они очень крепкие, но если давить поперек, они намного слабее. Модуль упругости в таком направлении может быть всего несколько десятков гигапаскалей. Это надо учитывать при создании новых материалов. Как нанотрубки расположены, так ведет себя весь материал в целом.

Кроме прочности и жесткости, важны и другие свойства. УНТ хорошо сцепляются с полимерной матрицей благодаря тому, что у них большая поверхность и многое взаимодействует. Но есть сложность – нанотрубки часто слипаются, их тяжело равномерно смешать. Если они плохо соединены с матрицей, их преимущества не работают как надо и материал не такой крепкий, как мог бы быть.

Электропроводность углеродных нанотрубок может быть разной. Некоторые трубы ведут себя как металл, другие – как полупроводник. Самые хорошие металлические трубки проводят электричество почти как медь, но они легче. Это значит, с их помощью можно делать материалы, которые хорошо проводят ток, например, чтобы защищать от статического электричества или молний в самолетах.

Теплопроводность у таких трубок тоже очень высокая. Она может быть больше, чем у алмаза, до 3000 Вт/(м·К). Это помогает отводить тепло там, где есть большая нагрузка. Но если трубки смешаны с матрицей, тепло проходит хуже из-за границ между разными частями материала.

Если в полимеры добавить нанотрубки, они становятся крепче и могут дольше служить без трещин. Трубки мешают появлению микротрещин и распределяют давление. Однако если их мало (менее 0,1–0,5% по массе), эффект небольшой. Если трубок много, они могут слипаться и прочность снизится обратно.

По числу слоев выделяют: однослойные нанотрубки – тонкая труба из одного слоя, диаметр от 0,4 до 3 нанометров; многослойные нанотрубки – из нескольких трубок, вложенных друг в друга, диаметр от 5 до 100 нанометров; двухслойные нанотрубки – занимают место между двумя другими типами.

По типу проводимости (хиральности) различают: «кресло» (armchair), когда индексы одинаковы – $n = m$, такие трубы ведут себя как металл и проводят ток очень хорошо; «зигзаг» (zigzag), когда $m = 0$, здесь свойства могут меняться; хиральные нанотрубки, у которых индексы записывают как (n, m) , где n и m – числа, но оба не равны нулю и друг другу.

По геометрии трубки бывают разного размера: диаметр бывает очень маленький – меньше нанометра, или большой – до 100 нанометров. Длина может быть разной – от очень маленькой до нескольких миллиметров или даже сантиметров. По виду концов трубки бывают закрытыми или открытыми. По структурному совершенству выделяют высокосовершенные нанотрубки с минимальным количеством дефектов, а также дефектные нанотрубки.



Для крыла БПЛА часто берут не одну, а много слоёв. Обычно такие трубки не слишком тонкие и не большие по длине, с разными добавками. Это даёт хорошее сочетание – трубка крепкая, но с ней просто работать.

1.2. Методы интеграции углеродных нанотрубок в полимерные композиционные материалы (ПКМ) для БПЛА

В эпоксидную основу часто добавляют углеродные нанотрубки. Благодаря этому состав становится прочнее и крепче, что важно для БПЛА. Такое введение почти не сказывается на массе – вес увеличивается совсем чуть-чуть. Кроме того, материал теперь лучше держит удары и трещины внутри не расходятся дальше. Этот композит служит дольше, не теряя свойств при работе и частых нагрузках. Кроме того, он приобретает электропроводность, чтобы убирать статическое электричество и защищать конструкцию от помех.

Сейчас есть несколько главных способов ввести УНТ в материал. Один – просто размешать его прямо в смоле. Второй – нанести УНТ на поверхность волокна, например, с помощью спрея или осаждения в особых условиях. Также можно вставить уже готовые изделия из УНТ – бумагу, нити или ленты между слоями материала. Еще один вариант – вырастить нанотрубки прямо на волокне, используя специальный газовый процесс. Среди этих методов в работе лучше всего изучен и подобран способ добавления УНТ прямо в эпоксидное связующее. После этого такой состав используют, чтобы пропитать ткань из стекла. Этот способ хорошо подходит для классического процесса производства композитов без сильных изменений технологии.

Главный объект работы – процесс, где готовят смесь нанотрубок и эпоксидной смолы. Потом к смеси добавляют отвердитель, и ею пропитывают стеклоткань. Основная научная задача этого пути – не дать нанотрубкам слипаться из-за их сильной тяги друг к другу. Для этого нужен хороший режим размешивания и правильно подобранные типы смолы и отвердителя. В самом начале вводят в смолу нужное количество УНТ (чаще всего от 0.1 до 1.0 по массе), потом всё хорошо перемешивают. Только после этого получают качественный материал, который хорошо работает в изделиях и отвечает нужным требованиям прочности, стойкости и электропроводности.

Для разрушения агломератов и достижения равномерного распределения наночастиц в объеме олигомера используется мощное ультразвуковое воздействие с погружным соноотродом, часто в комбинации с механическим перемешиванием. Критически важным параметром здесь является контроль температуры суспензии во избежание локального перегрева и преждевременной полимеризации смолы в зоне кавитации, поэтому процесс ведут в охлаждаемой ванне с циклами «озвучивание-охлаждение». Качество дисперсии оценивается визуально по отсутствию видимых агломератов на стекле, а инструментально – по изменению вязкости, которая при успешном диспергировании возрастает предсказуемо и не демонстрирует скачков.

Следующий этап, представляющий наибольшую практическую значимость для получения качественного ПКМ, – совмещение модифицированной УНТ смолы с отвердителем и последующая пропитка стеклоткани. После получения стабильной суспензии УНТ в эпоксидной смоле в нее вводится стехиометрическое количество аминного или ангидридного отвердителя, и смесь тщательно перемешивается при пониженных оборотах во избежание захвата воздуха. Поскольку введение УНТ, даже хорошо диспергированных, значительно увеличивает начальную вязкость связующего, требуется стадия дегазации в вакуумной камере для удаления пузырьков воздуха. Подготовленным компаундом осуществляют пропитку стеклоткани по технологии вакуумной инфузии (VaRTM) либо ручного ламинирования. Выбор технологии инфузии с использованием вакуумного мешка является более предпочтительным для конструкций БПЛА, поскольку позволяет точно контролировать соотношение «связующее/волокно» и равномерно распределить наномодифицированную смолу по всей толщине пакета сухой стеклоткани.

2. Проектирование и моделирование крыла БПЛА с внедрением УНТ

2.1. Изготовление экспериментальных образцов крыла БПЛА из техноплекса с эпоксидно-стеклопластиковым покрытием, содержащим углеродные нанотрубки

В рамках эксперимента изготавливались три образца полукрыла, имеющих одинаковый аэродинамический профиль и геометрию, но различающихся составом внешнего упрочняющего слоя: образец №1 – без углеродных нанотрубок (контрольный); образец №2 – с добавкой 0,4 г УНТ на навеску смолы; образец №3 – с добавкой 1,0 г УНТ на ту же навеску. Все работы выполнялись в лабораторных условиях при температуре 22 ± 2 °С.

Из плиты экструзионного пенополистирола «Техноплекс» толщиной 50 мм с помощью острого строительного ножа были вырезаны три прямоугольные заготовки с припуском 10–15 мм. Выжигание профиля осуществлялось самодельным станком с натянутой нихромовой нитью. По торцам каждой черновой заготовки симметрично закреплялись два одинаковых фанерных шаблона, соответствующих корневому и концевому профилям полукрыла. Оператор плавно перемещал натянутую нихромовую нить одновременно по контуру обоих шаблонов. После выжигания все три образца были вручную отшлифованы наждачной бумагой зернистостью Р80.

Для каждого полукрыла из рулона стеклоткани сатинового плетения плотностью 160 г/м² были выкроены две отдельные полосы для верхней и нижней поверхностей. Базовым связующим служил эпоксидный клей марки ЭДП. Для всех трёх образцов использовалась стандартная навеска смолы – 60 г, и отвердителя – 7,5 г (массовое соотношение 8:1). Для образца №1 смола и отвердитель смешивались механической мешалкой до достижения однородности. Для образца №2 в навеску смолы добавляли 0,4 г многостенных углеродных нанотрубок. Для образца №3 добавляли 1 г многостенных углеродных нанотрубок.

При ламинировании образца №1 пенопластовая сердцевина укладывалась на подложку, покрытую разделительной плёнкой. Сначала на нижнюю поверхность наносили эпоксидную смесь без нанотрубок, накладывали стеклоткань и разглаживали. Затем изделие переворачивали, наносили смолу на верхнюю поверхность, накладывали второй слой ткани. Процесс для образца №2 полностью повторял описанный, но с использованием эпоксидной композиции, содержащей 0,4 г УНТ. Третье крыло делали с помощью смеси, в которую добавили 1,0 г УНТ. Когда ламинирование было закончено, все образцы оставили при обычной комнатной температуре на 24 часа для отверждения.

2.2. Проведение испытаний крыла БПЛА на изгиб

Была поставлена цель узнать, насколько прочное и жёсткое крыло БПЛА с новым покрытием. Для этого сделали несколько образцов крыла. В каждом покрытии было разное число нанотрубок.

Экспериментальный стенд представлял собой жесткую вертикальную стойку с консольным креплением испытуемого образца. Крыло устанавливается в горизонтальном положении, обеспечивая консольное крепление одного конца. Для равномерного распределения нагрузки на законцовке крыла продевалась сквозная шпилька. Снизу на шпильку одевалась плоская шайба увеличенной площади. Нагружение осуществлялось вертикально по направлению вверх. Для создания усилия использовался механический привод. Контроль текущего приложенного усилия производился с помощью подвесного электронного динамометра ДЭП1-1Д-0,3Р-2 с максимальным пределом измерения 30 кг. Для измерения расстояния использовался лазерный измеритель длины. Измерение проводилось от контрольной точки пола до нижней кромки крыла.

Испытание каждого образца проводилось по единой методике: крыло закреплялось в установке; производилась фиксация начального показания расстояния от пола до крыла; с помощью затягивания гайки создавалось растягивающее усилие; с интервалом в 5-10 Н производилась остановка нагружения; в момент паузы проводилось измерение расстояния от пола до крыла лазерным измерителем; полученные показания заносились в протокол испытаний.



Для первого образца (контрольного) нулевой точкой была сила в 5 Н, при которой не наблюдался изгиб крыла. В точке с силой в 80 Н крыло начало разрушаться – ПКМ начал отслаиваться от заготовки. Максимальный изгиб крыла составил 34 мм. У второго образца с добавлением 0,4 г УНТ изгиб равнялся нулю при силе 0 Н. Данный образец выдержал большую нагрузку до начала разрушения, которое произошло при изгибе в 38 мм и приложенной силе в 100 Н. Максимальная сила, приложенная к образцу с добавлением 0,4 г УНТ, на 20 ньютонов больше максимальной силы, приложенной к контрольному образцу. Точкой отсчета для образца с добавлением 1 г УНТ стала точка с силой в 5 Н, при ней не наблюдался изгиб крыла. Третий образец выдержал самую большую нагрузку из всех трех образцов, которая составила 105 Н, и изгиб в 60 мм.

Анализируя графики, видно, что график третьего образца выше графиков первого и второго образцов – это значит, что при одинаковой деформации крыльев третий образец выдержал большую силу. Также из графиков видно, что крыло без добавления УНТ не смогло выдержать нагрузку, которая была приложена к образцам с добавленными углеродными нанотрубками. На начальном этапе деформации опытные образцы вели себя практически идентично, значительное изменение характеристик происходит тогда, когда к крыльям приложена большая сила.

Это может быть обусловлено структурой нанотрубок – свернутых в цилиндр из графеновых слоев. При добавлении в материал нанотрубки берут на себя часть механической нагрузки, работая как микроскопические армирующие элементы. Нанотрубки действуют как армирующие агенты в композитах, а именно препятствуют распространению трещин в материале, замедляя разрушения и поглощают энергию удара за счет равномерного распределения энергии. В работе были применены углеродные нанотрубки фирмы «Arkema».

2.3. Изучение способностей «умного» крыла с УНТ

Смысл новой идеи – в переходе от простой, всегда одной и той же формы крыла к такому крылу, что меняется под новые задачи. Новое крыло – другое. Оно живое и может менять себя само. Оно чувствует, что меняется снаружи, и может чуть-чуть подстроиться: изменить форму, сделать себя жёстче или мягче, удерживать нагрузку лучше. Главное в такой идее – то, что крыло может само смотреть, не испортилось ли что-то. Оно все время следит за собой. Видит, если случилась трещина, если материал стал хуже, если нагрузка стала больше.

Углеродные нанотрубки играют главную роль для такого крыла. Их вставляют внутрь крыла, в особый материал. Эти трубки работают не только для того, чтобы сделать материал крепче. Они делают внутреннюю сеть из множества маленьких проводников в материале, что обычно не проводит ток. Такая проводящая сеть сразу даёт несколько плюсов. Во-первых, материал сам чувствует, если его сжимают или гнут – теперь не нужно сверху ставить много внешних датчиков. Во-вторых, если к этому материалу подать ток или изменить в нём напряжение, можно менять его свойства: делать крыло мягче, жёстче, даже менять его форму, используя особый электротермический эффект.

Ещё одно важное свойство нанотрубок – пьезорезистивный эффект. Когда на композит давят или его сгибают, в сети этих микроскопических трубочек меняется расстояние, контакты нарушаются, и меняется сопротивление току. Это просто и быстро можно проверить приборами. Таким образом, весь материал становится одним большим датчиком. Комбинация этих двух свойств – хорошо проводить ток и меняться, когда давят – даёт эффект, когда материал и датчик, и исполнитель вместе. Сеть трубок сразу измеряет, например, повреждения, и тут же может работать: в нужном месте нагревать или даже «лечить» трещины или небольшие царапины.

Электротермический эффект основан на том, что если по проводнику пропускать ток, он нагревается – выделяется тепло Джоуля. В новых «умных» крыльях весь композит – это уже не просто материал, а и внутренний обогреватель: сеть трубок встроена сразу в структуру. По всему крылу делают специальные слои, которые хорошо ведут электричество и находятся близко к оболочке крыла. Когда подают ток к этим слоям, вся сеть в материале начинает греться. Теперь не нужно отдельно ставить дополнительные нагревательные элементы.



Главный плюс этой системы в том, что она может греть ровно всю нужную часть, например, перед крыла или лопасть винта. Старые виды нагрева делают тепло в одном месте, а не по всей площади. Еще одно важное преимущество – она легче. Здесь нет нужды ставить тяжелые части из металла, их крепить и делать подложки. Нужно добавить только совсем немного нанотрубок в основной материал.

Очень важно правильно рассчитать, насколько такая система тратит энергию. Нужно найти, сколько тепла выходит в сам материал, и сколько уходит наружу. Главную роль в этом играет поток воздуха, который сильно охлаждает детали при быстрой скорости. Чтобы это узнать, нужно посчитать, как деталь отдаёт тепло наружу, учесть её толщину, способность проводить тепло (которую тоже можно улучшить с помощью УНТ), и как быстро её охлаждает воздух. Потом, зная, как хорошо слой с УНТ проводит ток и сколько тепла надо, определяют, какой нужен ток, какое напряжение и сколько в общем потратит эта система на каждый метр поверхности. Подобные подсчёты помогают понять, насколько такой способ лучше привычных. Они позволяют сделать слой с УНТ оптимальным: выбрать его толщину и как он лежит, чтобы потратить как можно меньше энергии, но получить надёжную защиту от льда даже там, где условия самые тяжёлые и холодные.

Заключение

Проведенный разбор ясно показывает: применение углеродных нанотрубок для крыла беспилотного аппарата – это не просто шаг вперёд, а большой качественный скачок. Если добавить УНТ к полимеру или металлу, можно сразу серьёзно улучшить важные свойства. Становятся лучше прочность и жёсткость, и это прямо видно. Теперь можно сделать крыло легче – оно выдержит ту же нагрузку, но будет весить меньше. Если масса та же, то запас прочности и срок службы крыла вырастет. Когда материал лучше держит удар и не трескается, аппарат проще защитить, он лучше переносит разные тяжёлые условия.

Но что даже важнее – сам материал теперь может выполнять больше дел. Крыло становится не только крепким, но и «умным». Материал с УНТ хорошо проводит ток за счёт особой сетки. С его помощью можно согреть край крыла от налёта льда. В отличие от обычных нагревателей, тут нет лишней массы, тепло делится равномерно, чинить такое проще. Ещё, применяя пьезоэффект, крыло само следит за собой: чувствует, где появляются трещины, ранние повреждения, как сильно оно гнётся. Аппарат сам замечает проблему и быстрее реагирует на неё.

Благодаря росту жёсткости новое крыло можно делать длиннее и тоньше, не опасаясь, что оно слишком согнётся. От этого самолёт лучше летит, меньше тратит силы на борьбу с воздухом. Он дольше в полёте и улетает дальше. Материал гасит вредные колебания, поэтому аппарат стабильно летит, легче управляется даже в плохую погоду. К тому же, чем легче крыло, тем больше места для полезных грузов, топлива или разной аппаратуры.

Использование УНТ влияет и на само производство. Сначала эти трубки дороже, их сложно добавлять к матрице, но позднее на общем сроке службы все эти затраты окупаются. Когда много функций внутри одного материала, деталей потребуется меньше, меньше соединений, которые часто ломаются или требуют замены. К тому же, материал служит дольше и не так боится коррозии. Всё это заметно снижает цену починки и ухода за крылом.

По итогам проведенной работы можно сделать вывод, что полученный образец с наибольшим количеством нанотрубок показал себя лучше всех при проведении экспериментов. А конкретно – он получился примерно на 20% крепче образца в составе которого не было углеродных нанотрубок. Благодаря этим экспериментам видно, на сколько лучше стал материал в состав которого были добавлены нанотрубки.

Список литературы:

1. Бармин, А. А. Разработка и исследование фюзеляжа и крыла БПЛА с использованием углеродных нанотрубок / А. А. Бармин, А. П. Владыкина, И. А. Шестаков // Выставка инноваций – 2025 (весенняя сессия): Сборник статей 39-й Всероссийской выставки-сессии



студенческих инновационных проектов, Ижевск, 24–25 апреля 2025 года. – Ижевск: ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова, 2025. – С. 13-19

2. Борисова В. А. Исследование физико-химических свойств и эксплуатационных характеристик полимерных композиционных материалов, модифицированных углеродными структурами / В. А. Борисова // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2022. – № 1. – С. 161-173

3. Болдырев А.В. Оптимизация распределения материала в комбинированных авиационных конструкциях: дис. канд. тех. наук: 05.07.02. – 2015. – 157 с.

4. Брусов, В. С. Оптимизация геометрии крыла БПЛА в терминах многоцелевого подхода / В. С. Брусов, В. П. Петручик // Материалы XXI научно-технической конференции по аэродинамике, п. Володарского, 25–26 февраля 2010 года. – п. Володарского: Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, 2010. – С. 37

5. Брусов В.С., Баранов С.К. Оптимальное проектирование летательных аппаратов. Многоцелевой подход. Москва, Машиностроение, 1989. 230 с.

6. Гамлицкий Е. Ю. Формирование нанопленочных композитов, оценка их свойств и возможности использования в авиастроении / Е. Ю. Гамлицкий, А. В. Гелиев, В. Н. Семенов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – № 5-2 (36). – С. 269-274

