НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ: МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Кокандский ГУ -PhD **Сиддиқов Р.У**,
ЮКИУимени **М. Ауэзов** PhD **Ибрагимова З.А**

Аннотация. В статье проанализированы механические свойства полимерных композиционных материалов нового поколения, модифицированных углеродными нанотрубками, графеном и наночастицами. Показано, что содержание наномодификатора, равномерность его распределения и связь с матрицей на границе раздела являются основными факторами, влияющими на прочность, жёсткость и трещиностойкость. Оценены возможности применения нанокомпозитов в авиационных конструкциях (крыло, фюзеляж, детали двигателя), а также их эффективность в снижении массы и повышении ресурса.

Ключевые слова: нанокомпозит, углеродные нанотрубки, графен, углепластик, механические свойства, матрица, авиационные конструкции, лёгкие материалы.

Одним из основных направлений современной авиационной промышленности является снижение массы конструкции самолёта, уменьшение расхода топлива и увеличение срока службы. Снижение массы планера на каждый 1 кг даёт ощутимую экономию топлива в течение полёта, поэтому полимерные композиционные материалы всё чаще заменяют традиционные алюминиевые и титановые сплавы [1, 2]. Широко применяемые в настоящее время углепластики превосходят металлы по удельной прочности, однако их матрица хрупка, а сопротивление межслоевому сдвигу и ударным нагрузкам ограничено [4, 5].

Нанотехнологии открыли новые возможности для устранения этих недостатков. Введение в матрицу или на поверхность волокна модификаторов размером 1–100 нм позволяет целенаправленно управлять механическими, тепловыми и электрическими свойствами материала. Поэтому наноструктурированные композиты нового поколения в развитых странах считаются одним из приоритетных направлений материаловедения.

Композиционный материал состоит из двух и более фаз: непрерывная фаза называется матрицей, а упрочняющая её фаза — наполнителем [7]. В нанокомпозитах хотя бы один размер наполнителя находится в нанометровом диапазоне. Основные наномодификаторы: одно- и многостенные углеродные нанотрубки, графен и оксид графена, наночастицы нанокремнезёма (SiO_2),

оксида алюминия (Al_2O_3), диоксида титана (TiO_2), а также слоистые силикаты (монтмориллонит) [6].

По типу матрицы нанокомпозиты делятся на три группы: полимерные (эпоксидные, бисмалеимидные, полиимидные, термопласты), металлические (на основе Al, Mg, Ti) и керамические (на основе SiC, Al_2O_3). В авиации к настоящему времени наиболее распространены системы на эпоксидной и бисмалеимидной матрице, армированные углеродным волокном и наномодифицированные [1,4]. Металлические и керамические нанокомпозиты считаются перспективными в основном для высокотемпературных деталей двигателей [2].

Эффективность наномодификаторов определяется их высокой удельной площадью поверхности и особыми свойствами. По теоретическим расчётам, модуль упругости графена и углеродных нанотрубок составляет около 1 ТПа, а предел прочности достигает десятков ГПа [6]. На практике эти значения реализуются не полностью, поскольку свойства зависят от равномерности распределения наночастиц, степени агломерации и адгезии к матрице на границе раздела [3, 5].

Основные факторы, определяющие механические свойства: (1) содержание модификатора — оптимальный результат, как правило, достигается в диапазоне 0,1–2 масс. %, при больших количествах частицы агломерируют и прочность снижается; (2) геометрия и ориентация наночастиц; (3) функционализация поверхности (введение карбоксильных, аминогрупп), усиливающая химическую связь с матрицей; (4) способ диспергирования — ультразвук, трёхвалковая мельница, высокоскоростное сдвиговое смешение. Во многих исследованиях отмечено, что при введении небольшого количества наномодификатора в эпоксидную матрицу модуль упругости, прочность при межслоевом сдвиге и вязкость разрушения возрастают соответственно примерно на 10–30 %; эти значения изменяются в зависимости от системы [2, 5].

Наночастицы препятствуют росту трещин: они поглощают энергию на вершине трещины, отклоняют её и образуют мостики, а за счёт вытягивания частиц из матрицы расходуется дополнительная энергия. В результате повышаются ударная вязкость и усталостная прочность, что важно для авиационных конструкций [1, 7]. В таблице 1 приведены сравнительные ориентировочные значения свойств.

Таблица 1. Сравнительные показатели свойств авиационных материалов (ориентировочные)

Материал	Плотность, г/см³	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости, ГПа	Удельная прочность (относительная)
Алюминиевый сплав (Д16, 2024)	2,8	400–480	70	1,0
Титановый сплав (ВТ6)	4,4	900–1000	110	1,5
Углепластик (УП)	1,5–1,6	1500–2200	120–150	~8

ISSN: 3060-4648 | www.eyib.uz

УП + 0,5–1 % УНТ/графен	1,5–1,6	1700–2500	135–170	~9–10

Для оценки механических свойств применяют стандартные методы испытаний: на растяжение (ASTM D3039, ГОСТ 25.601), прочность при межслоевом сдвиге (ASTM D2344), энергию межслоевого разрушения в режиме I (ASTM D5528) и сжатие после удара (CAI). Именно эти показатели определяют несущую способность авиационных конструкций, поэтому для наномодифицированного композита требуются результаты испытаний как минимум по этим четырём группам [4].

Механизмы упрочнения можно обобщить следующим образом. Во-первых, нагрузка передаётся от матрицы к наночастице с высоким модулем (механизм передачи нагрузки). Во-вторых, вокруг частиц ограничивается подвижность полимерных цепей, в результате повышаются температура стеклования и теплостойкость. В-третьих, наночастицы удлиняют путь распространения микротрещин и препятствуют их слиянию. В-четвёртых, при выращивании нанотрубок на поверхности углеродного волокна заметно повышается прочность границы раздела между волокном и матрицей; такой способ называют «ворсистым волокном» (гибридным волокном) [3,6]. Совместное действие этих механизмов определяет общие свойства нанокомпозита, и выбор модификатора без их учёта не даёт ожидаемого эффекта.

Доля композитов в авиации неуклонно растёт: в планере Boeing 787 и Airbus A350 композиты составляют примерно половину по массе. В России кессон крыла самолёта МС-21 изготовлен из полимерного композита методом инфузии, ВИАМ разрабатывает матрицы и наполнители нового поколения [1, 3]. Наномодификация развивает это направление в следующих областях.

Первичная конструкция: панели крыла и фюзеляжа, стрингеры, шпангоуты. Наномодифицированная матрица повышает межслоевую прочность, снижает риск деламинации (расслоения) и за счёт уменьшения толщины экономит массу.

Многофункциональные покрытия: УНТ и графен придают композиту электропроводность. Это обеспечивает защиту от удара молнии, снятие статического заряда и электромагнитное экранирование; заменяет применявшиеся ранее тяжёлые металлические сетки [3, 6].

Двигатель и нагреваемые части: композиты на наночастичной полиимидной, бисмалеимидной и керамической матрице сохраняют механические свойства при 250–350 °C и выше; предусматривается их применение в лопатках компрессора, корпусах и элементах тепловой защиты [1, 2].

Ремонт и мониторинг: наночастицы позволяют композиту проводить самодиагностику — по изменению электрического сопротивления выявляются микротрещины и ударные повреждения, что снижает затраты на техническое обслуживание [6].

Широкому промышленному внедрению нанокомпозитов препятствует ряд факторов: сложность равномерного распределения наночастиц в больших

объёмах; рост вязкости при препреговом и инфузионном процессах; высокая стоимость наноматериала; обеспечение стабильности свойств от партии к партии; требования авиационной сертификации и вопросы экологической безопасности наночастиц. Для решения этих проблем необходимо совершенствовать технологии диспергирования, выращивать наноструктуры непосредственно на волокне (гибридное волокно), развивать цифровое моделирование производства и методы контроля качества [2, 4].

В Узбекистане сформировалась научная школа по полимерным композиционным материалам, изучены композиты на основе местного сырья и их трибологические и механические свойства. Перспективным направлением является расширение прикладных исследований по нанокомпозитам с использованием потенциала авиационной промышленности страны, в том числе Ташкентского авиационного производственного объединения.

Анализ показывает, что наноструктурированные композиты по сравнению с традиционными позволяют повысить модуль упругости, межслоевую прочность, ударную и усталостную прочность. Эффективность зависит от оптимального содержания наномодификатора, равномерности его распределения и адгезии на границе раздела. В авиации они перспективны для снижения массы, многофункциональности и повышения ресурса; однако технологическая сложность, стоимость и вопросы сертификации требуют научно-практических решений.

Литература

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. — 2015. — №1(34). — С. 3–33.

2. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. — 2012. — Т. 82, №6. — С. 520–530.

3. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. — 2010. — №4. — С. 2–7.

4. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. — СПб.: Научные основы и технологии, 2008. — 822 с.

5. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. — СПб.: Профессия, 2008. — 560 с.

6. Елисеев А.А., Лукашин А.В. Функциональные наноматериалы. — М.: Физматлит, 2010. — 456 с.

7. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. — М.: Химия, 1981. — 232 с.