



HAL
open science

Интеллектуальные авиаконструкционные материалы и микросистемная техника

Илья Клубуков, Maksim Alekhin, Sergey Musienko

► To cite this version:

Илья Клубуков, Maksim Alekhin, Sergey Musienko. Интеллектуальные авиаконструкционные материалы и микросистемная техника. SSRN: Social Science Research Network, 2012, <10.2139/ssrn.2456695>. <hal-01773653>

HAL Id: hal-01773653

<https://hal.science/hal-01773653>

Submitted on 23 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Московский физико-
технический институт
(государственный
университет)

Конференция серии
«Будущее индустрии»

Sky Shell 2012

М.Д. Алехин
И.Д. Клабуков
С.В. Мусиенко

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АВИАКОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА



Москва –2012

О ПРОГРАММЕ

В СОЗДАНИИ перспективных аэрокосмических систем нового поколения ключевым фактором достижения успеха является использование комплексного подхода к проектированию, в основе которого лежит использование интеллектуальных конструкционных систем и материалов, способных автономно адаптироваться и формироваться в зависимости от внешних условий и внутренних факторов. В общем случае они должны самостоятельно приспосабливаться к изменениям и непредвиденным ситуациям в условиях поставленной задачи. При этом высокая надежность таких материалов обеспечивается возможностью самовосстановления, по аналогии с регенерацией в биологических системах.

Новейшие материалы с уникальными технико-эксплуатационными характеристиками являются решающим фактором при построении конкурентной авиационной и космической техники нового поколения. Первоначально важным является преодоление критического барьера отношения эффективности эксплуатационных характеристик к массе материалы, что в перспективе не может быть достигнуто, используя традиционные инженерные принципы и подходы к проектированию функциональных систем.

Новая концепция интеллектуальных конструкционных структур является предпосылкой создания материалов, адаптированных для условий мультифункциональных аэрокосмических полетов.

Редакторы сборника

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	1
2. Концепция создания интеллектуальных материалов	8
2.1. Интеллектуальные материалы	8
2.2. Интеллектуальные композиты	10
2.3. Самовосстанавливающиеся материалы: полимеры, керамика, металлы	11
2.4. Самовосстанавливающиеся материалы: структуры на основе графена	13
3. Перспективные направления исследований при создании интел- лектуальных авиаконструкционных материалов и микросистем	15
3.1. Совершенствование пьезоэлектрических полимеров	15
3.2. Улучшение оптоволоконных датчиков и сенсоров	16
3.3. Разработка микросистем активного управления аэродинамическим потоком	17
3.4. Автономное управление полетом с применением жидкостных исполнительных элементов	18
3.5. Использование иономеров для создания самовосстанавливающихся композитов	19
4. Применение интеллектуальных конструкционных материалов и систем в авиации	20
4.1. Мониторинг состояния композитных материалов	21
4.2. Компенсация вибраций и циклических нагрузок	22
4.3. Системы активного подавления шумов	23
4.4. Управление морфингом несущих поверхностей	25
4.5. Внедрение интеллектуальных материалов в авиации	26
5. Вызовы и перспективы использования современных интеллектуальных материалов и структур	28
Редакторы	31

1. ВВЕДЕНИЕ

ПЕРВОСТЕПЕННАЯ важность фундаментальных исследований и технологий получения новейших конструкционных материалов для создания аэрокосмических летательных аппаратов нового поколения признается не только специалистами в области материаловедения. По существу, основная часть радикальных изменений в функциональных и технических возможностях образцов авиационной и космической техники была и продолжает оставаться прямым результатом совершенствования существующих или открытия совершенно новых материалов и структур. Широта последствий — от технологии *стэлс*, обязанной своим появлением возможности конструирования материалов с заданной реакцией на электромагнитное излучение, до века информационных технологий, благодаря комплексу фундаментальных исследований в области полупроводников и волоконной оптики.

Принимая во внимание особую значимость создания новых материалов для обеспечения национальной безопасности и развития DARPA целенаправленно осуществляет долгосрочную программу поддержки фундаментальных исследований в сфере материаловедения и микросистемной техники, направленную на решение важнейших задач, возникающих при разработке перспективных оборонных систем специального назначения. Начало реализации этого направления было положено в первой половине 1960-х гг., когда было решено начать оказание содействия междисциплинарным научно-исследовательским лабораториям. Система таких лабораторий, позднее трансформировалась в Лаборатории материаловедения Национального научного фонда США (NSF), и стала основой стремительного развития материаловедения как нового междисциплинарного научного направления.

В последующие годы DARPA активно поддерживала прорывные фундаментальные исследования на передовом рубеже материаловедения. Необходимо отметить, что значительная часть усилий при реализации таких высокорискованных программ была сосредоточена на первоначальном планировании, определении будущего облика разработок, выборе базовых технологий и стратегических направлений развития. Результаты программ DARPA в области создания новых материалов существенно преобразили нашу жизнь. К ним можно отнести применение арсенида галлия (GaAs) в высокочастотных радиоустройствах, монокристаллы карбида кремния (SiC) для приложений эксплуатации в условиях высоких температур, создание уникальных композитов для высокоэффективных конструкционных узлов и покрытий, уникальные металлические сплавы для газотурбинных двигателей, новые технологические процессы и многие другие.

В настоящее время DARPA активно направляет свои ресурсы в разработку нового поколения интеллектуальных конструкционных материалов и систем, которые уже в ближайшем будущем помогут достичь принципиально новых возможностей при создании специальных изделий военного, коммерческого и двойного назначения. Особенно перспективным является их использование при проектировании нового поколения авиакосмической техники для обеспечения научно-технического превосходства.

Исследовательский институт BiMaT (Biologically Inspired Materials Institute) был создан как единое виртуальное исследовательское пространство для реализации долгосрочной программы NASA в области наук о материалах, объединив усилия ведущих ученых из профильных центров:

NASA Langley Research Center;
Northwestern University;
Princeton University;
University of California at Santa Barbara;
University of North Carolina at Chapel Hill;
National Institute of Aerospace.

Миссией ViMaT является создание автономных интеллектуальных конструкционных материалов и систем для авиакосмической техники на основе биоподхода к инженерному проектированию и биомиметических процессов.

Основные направления исследований NASA Biologically Inspired Materials Institute:

- самовосстанавливающиеся материалы и покрытия;
- самоорганизующиеся регуляторные структуры и системы;
- сенсорные и активные элементы с улучшенными характеристиками;
- композиты на основе полимеров, керамики, адгезивов с новыми свойствами;
- структуры на основе графена.

Преимущества использования интеллектуальных авиаконструкционных материалов и микросистем:

- улучшение летно-технических характеристик воздушного судна – за счет адаптации аэродинамики и поверхностей крыла к условиям полета по принципу обратной связи;
- увеличение срока службы функциональных компонентов – за счет сохранения структуры;
- увеличение ресурса обшивки – за счет использования самовосстанавливающихся покрытий;
- повышение комфорта экипажа и пассажиров – за счет снижения вибрации и шума.

Области применения интеллектуальных конструкционных материалов и микросистем в авиации:

- Мониторинг состояния композитных материалов. В отличие от хорошо известного механизма образования трещин в металлических конструкциях процесс износа композитов носит слабопредсказуемый характер. Система Smart Layers использует слой встроенных активных элементов, генерирующих электромагнитное, и регистрирующих сен-

соров. Она позволяет регистрировать изменение структуры материала и детектировать трещины с точностью до 0,1 мм.

- Подавление структурных вибраций. Адаптивные системы для подавления структурных вибраций реализуются на основе пьезоэлектриков, контролирующих свойства жесткости и демпфирования динамической системы. Использование системы SMART (Smart Material Actuated Rotor Technology) для адаптивного подавления вибраций главного вертолетного ротора позволило добиться ее снижения в среднем на 11,9 дБ.
- Подавление шума. Подавление шума основано на использовании системы акустических сенсоров, регистрирующих параметры шума, набора активных пьезоэлектрических керамических элементов, расположенных по всему фюзеляжу, которые формируют ответную реакцию, снижая низкочастотный шум. Применение технологии UltraQuiet Cabin позволило добиться общего снижения уровня шума, с наибольшим его подавлением до 28 дБ в кабине экипажа.
- Управление морфингом плоскостей крыла. Целью проекта Smart Wing Project, финансируемого DARPA, является создание бесшарнирного механизма контроля положения закрылков на задней кромке крыла аналогично процессу парения птиц в потоке воздуха. Результаты показали существенное улучшение летно-технических характеристик воздушного судна. Удалось достичь контролируемого изменения угла закрылков до 20 градусов со скоростью более 80 градусов в секунду. Технология Smart Wing Project является особенно перспективной при создании новых беспилотных летательных аппаратов.

2. КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

СОГЛАСНО общепринятому определению, под интеллектуальным материалом или конструкцией понимается система, способная регистрировать внешние воздействия и активно реагировать на них, изменяя свои свойства в режиме максимально близком к реальному. Такие изменение свойств позволяют материалу или конструкции динамически подстраиваться к условиям окружающей среды и регулировать собственный отклик для получения оптимальных характеристик. При этом прослеживается очевидная аналогия с биологическими системами, где мозг (орган управления), органы чувств (датчики) и мышцы (исполнительные механизмы) совместно функционируют, воспринимая внешние раздражители и формируя соответствующую ответную реакцию.

2.1. Интеллектуальные материалы

Интеллектуальные материалы (*smart materials*) – класс различных по химическому составу и агрегатному состоянию материалов, которые объединяет проявление одной или нескольких физических (оптических, магнитных, электрических, механических) или физико-химических (реологических) характеристик, значительно (обратно или необратно) изменяющихся под влиянием внешних воздействий: давления, температуры, влажности, pH среды, электрического или магнитного поля и других факторов.

Интеллектуальными разнородные материалы этой группы делает проявление взаимозависимых, но различных по своей природе свойств (память формы, пьезоэлектрических, термохромных, фотохромных, магниторео-

логических), что позволяет использовать их как сенсоры, чувствительные к какому-либо внешнему воздействию, либо в качестве актуаторов, вызывающих искусственно совершаемое действие при подаче контролирующего сигнала. И в том, и в другом случаях функция отклика на воздействие, как правило, является нелинейной. Некоторые из интеллектуальных материалов могут самостоятельно реагировать на внешние воздействия, как, например, биметаллические пластины в простейших регуляторах температуры.

Наиболее часто к интеллектуальным материалам относят пьезоэлектрики (альфа-кварц, титанат-цирконат свинца), выступающие в роли «сенсоров» или «актуаторов». В последнее время к ним же причисляют термоэлектрики, мультиферроики, магнитокалорические материалы, материалы с эффектом гигантского магнетосопротивления, магнитореологические, электрореологические жидкости, материалы, обладающие эффектом памяти формы (нитинол и др.), термо- и фоточувствительные полимеры. К интеллектуальным материалам также можно отнести полимерные гели, способные в сотни раз изменять свой объем (коллапс геля) при небольшом изменении внешних условий (температуры, состава растворителя, водородного показателя среды — pH). Различные полимерные покрытия, значительно изменяющие свои электропроводящие, оптические и другие свойства при сорбции определенных веществ, применяются в сенсорах приборов для мониторинга окружающей среды, в частности, для определения концентрации токсичных веществ.

Не все интеллектуальные материалы непосредственно относятся к категории наноматериалов, однако они часто находят применение в области нанотехнологий. Так, сегнетоэлектрики (пьезоэлектрики) используются для создания высокоточных позиционирующих устройств (в частности, для сканирующей зондовой микроскопии), в магнитореологических жидкостях применяются высокодисперсные магнитные частицы (наночастицы). Ряд наноустройств создан на базе пьезоэлектриков (нановесы, одномерные наноструктуры из титаната бария или оксида цинка, использующиеся для генерации электроэнергии).

2.2. Интеллектуальные композиты

Интеллектуальные композиты (*smart composites*), иначе самоорганизующиеся системы – особым образом структурированные системы, состоящие из подсистем считывания внешнего сигнала (воздействия), его обработки, функционального отклика, механизмов обратной связи, самодиагностирования и самовосстановления (в случае обратимости).

Каждый элемент такой системы имеет определенную функциональность, которая реализуется соответствующими свойствами разрабатываемых с этой целью перспективных материалов. Вся система структурирована таким образом, чтобы выполнить самоконтролируемое действие, подобное функционированию живого организма, способного «принимать решение и совершать действие».

Известными примерами материалов, на основе которых можно сконструировать подобную систему, являются:

- сплавы и полимеры с памятью формы, которые деформируются и восстанавливают свою форму при изменении температуры или напряженности магнитного поля;
- pH-чувствительные полимеры, которые набухают или коллапсируют при изменении кислотности окружающей среды;
- температурочувствительные полимеры, изменяющие свои свойства при изменении температуры внешней среды;
- галохромные, электрохромные, термохромные, фотохромные материалы, которые изменяют цвет (пропускание) при изменении кислотности среды, приложенного напряжения электрического поля, температуры среды, облучении светом соответственно;
- неньютоновские жидкости, которые изменяют свою вязкость вплоть до потери текучести при изменении величины приложенной скорости сдвига.

Достигнутые в последнее время успехи в области создания функциональных наноматериалов и интеллектуальных конструкционных микросистем посредством управления их структурной и композиционной организа-

ей по принципу «снизу–вверх», основанные, в том числе, на разработанных ранее молекулярных, нано– и микроразмерных материалах, являются первым шагом, объединяющим функциональные материалы с логической системой.

2.3. Самовосстанавливающиеся материалы: полимеры, керамика, металлы

Самовосстанавливающиеся материалы – класс интеллектуальных материалов, способных частично или полностью восстанавливать причиненные им повреждения, например, образовавшиеся трещины. Одним из их самых выдающихся свойств биологических материалов является способность к самовосстановлению и регенерации своих функций после получения внешних механических повреждений. В природе самовосстановление может происходить как на уровне единичных молекул (восстановление ДНК), так и на макроуровне (срастание сломанных костей, восстановление поврежденных кровеносных сосудов, заживление ран). Однако, материалы, изготовленные человеком, обычно не обладают подобной способностью к самовосстановлению (хотя бы потому, что «живыми» в полном смысле они не являются).

Традиционно искусственные материалы разрабатываются исходя из парадигмы «предотвращения повреждения», а не «управления повреждением». При этом, бесспорно, самовосстанавливающиеся материалы открыли бы огромные возможности, в особенности в тех случаях, когда в труднодоступных зонах необходимо обеспечить надежность материалов на как можно более длительный срок. Кроме того, самовосстановление было бы идеально для материалов, склонным к повреждениям, например, в случаях с поверхностными покрытиями.

Для инженерных целей разрабатываются различные стратегии и подходы для создания самовосстанавливающихся материалов. Исследования проводятся, в частности, для металлов, керамики и полимеров. Необходимым условием для самовосстановления повреждения является формирование

подвижной фазы, которая сможет «затянуть» трещину. В зависимости от используемого материала может изменяться необходимая температура: температура окружающей среды для бетона; низкие температуры (<120°C) для полимеров и их соединений; высокие температуры для металлов (<600°C) и керамики (>800°C).

Самовосстанавливающиеся материалы могут быть разделены на два различных класса (в зависимости от применяемого механизма инициирования и природы процессов самовосстановления): автономные и неавтономные. Для неавтономных самовосстанавливающихся материалов требуются внешнее инициирование, например, высокая температура или свет. В случае же автономного самовосстановления материалы не требуют никакого дополнительного внешнего импульса, само повреждение и является импульсом к восстановлению.

Также может быть выделено еще одно свойство соответствующего процесса самовосстановления для отличия подкласса материалов, а именно: «внешнее» (процесс восстановления основан на неких внешних восстанавливающих компонентах, таких как микро – или нанокапсулы, специально внедренных в матрицу материала) и «внутреннее» (не предусматривает наличия каких-либо отдельных восстанавливающих составов) инициирование самовосстановления.

В настоящее время, полимеры (и композиты на их основе) являются наиболее изученной категорией материалов в контексте способности к самовосстановлению. Однако главным недостатком процесса с внешним инициированием самовосстановления посредством внедрения восстанавливающих компонентов является возможность лишь однократной такой «регенерации».

Как показывают эксперименты, ни сферическая капсула, ни полые структуры не являются идеальными для достижения высокой эффективности восстановления. Гораздо большая эффективность восстановления может быть достигнута при использовании удлиненных капсул с соотношением сторон 1:10. Также для восстановления полимеров могут применяться

и другие механизмы инициирования (электрическое, электромагнитное, баллистическое, фотоинициирование).

По сравнению с ковалентными связями, слабые взаимодействия, такие как водородные связи, скорее всего, дадут возможность получить потенциальные самовосстанавливающиеся материалы. Яркий пример автономного самовосстанавливающегося полимера – олигомерный термопластичный эластомер. После повреждения требуется просто прижать друг к другу поверхности разлома, и материал восстановится.

Один из примеров самооживления керамики – самовосстанавливающее окисление SiC-керамики. Активный наполнитель, внедренный в матрицу, окисляется проникающим кислородом, тем самым образованный SiO₂ полностью закрывает повреждение.

Необходимо отметить, что, лишь очень мало может быть найдено примеров успешных разработок в сфере самовосстановления металлов. Это связано с тем что самооживление в металла – процесс намного более сложный и трудный, чем в других классах материалов.

Таким образом, необходимы дальнейшие исследования в области самовосстанавливающихся материалов. В частности, нужна разработка таких материалов, которые, помимо механических свойств, восстанавливали бы и другие свойства (проводимость и т.д.) после повреждения. Также существует и особенно актуальна сложная задача в отношении разработок самовосстанавливающихся наноструктур.

2.4. Самовосстанавливающиеся материалы: структуры на основе графена

Материалы со способностью самостоятельно восстанавливать повреждения давно считаются перспективным направлением научно-технических разработок. Основным кандидатом на роль вещества с автоматическим воссозданием структуры учёные называют графен.

Графен – пространственная модификация углерода, слой с периодической структурой и толщиной в один атом. Долгое время были известны только две углеродных формы: алмаз и графит. В середине прошлого века советские физики под руководством академика Коршака открыли третью – карбин, а с развитием нанотехнологий число аллотропных модификаций углерода стало измеряться десятками. За открытие в 2004 году графена наши соотечественники Константин Новосёлов и Андрей Гейм – выпускники МФТИ, получили шесть лет спустя Нобелевскую премию по физике.

Одной из важных проблем в синтезе графена является достижение максимальной степени чистоты вещества при сохранении его структуры. Металлические примеси и попытки их удаления могут нарушать целостность графеновой плёнки, оставляя в ней повреждения. В своём новом исследовании Константин Новоселов описывает процесс спонтанного схлопывания дефектных участков за счёт взаимодействия между соседними атомами углерода. Эффект наблюдался при комнатной температуре и успешность закрытия дефекта напрямую зависела от его размера. Данная работа интересна как для оптимизации технологии синтеза графена так и в целях разработки новых самовосстанавливающихся материалов.

3. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АВИАКОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МИКРОСИСТЕМ

ПО МНЕНИЮ экспертов, к настоящему времени сфера научных исследований в области создания интеллектуальных материалов в некотором смысле прошла полный круг своего развития. Первые подобные материалы, которые только начинают широко использоваться сегодня, по сути, являются управляемыми материалами в составе некоторой отдельной конструкции, в которой они формируют ответную реакцию в зависимости от условий внешней среды. При этом конечной целью является создание интеллектуального материала в виде конструкции, способной самой изменять свое состояние, перемещаться и даже самовосстанавливаться. Хотя такая цель весьма амбициозна, результаты исследований по ключевым направлениям такой сложной междисциплинарной программы сами по себе являются крайне интересными и многообещающими. Тем более, еще больший синергетический эффект может быть достигнут в результате суммы этих технологий.

3.1. Совершенствование пьезоэлектрических полимеров

Усовершенствование пьезоэлектрических полимеров является особенно актуальным для широкого круга приводных устройств летательных аппаратов, включая активное управление потоком, регулирование уровня шума и аэроупругости. Несмотря на это, для множества перспективных применений этих материалов необходимы более высокие характеристики смещений, чем способны обеспечить обычные пьезоэлектрики. Ученые

из исследовательского центра NASA в Лэнгли разработали технологию пьезоэлектрического привода с увеличенным смещением под кодовым названием THUNDER (тонкослойный композитный униморфный сегнетоэлектрический привод и чувствительный элемент – THin layer composite UNimorph ferroelectric DrivER and sensor), отвечающую требованиям увеличенного смещения. Приводы THUNDER представляют собой приводы униморфного типа, которые состоят из пьезоэлектрического керамического слоя, сопряженного с одним или несколькими вторичными непьезоэлектрическими слоями. Из-за использования повышенных температур во время отверждения в слоях материалов возникают внутренние напряжения, которые значительно улучшают характеристику смещения за счет толщины исполнительных механизмов.

Высокоэффективные пьезоэлектрические полимеры представляют интерес также для космической промышленности, где они могут найти применение в различного рода датчиках, включая акустические датчики, датчики потока и тензометрические элементы. Исследования полимеров с пьезоэлектрическим эффектом, шедшие на протяжении последних нескольких лет, привели к открытию перспективных высокотемпературных пьезоэлектрических реакций в ряде новых полиимидных материалов.

3.2. Улучшение оптоволоконных датчиков и сенсоров

В настоящее время при поддержке DARPA проводится комплекс исследований в области разработки оптоволоконных датчиков для контроля затвердевания композитов, а также мониторинга состояния и конфигурации конструкций авиакосмических аппаратов. Исследуются методики применения оптоволокна для контроля процесса затвердевания композита в режиме реального времени в процессе производства и контроля конструктивной целостности и износа структур в процессе эксплуатации.

В частности, разрабатывается оптоволоконный датчик, способный измерять химический состав, механическое напряжение и температуру. Исследуются как одномодовые, так и многомодовые оптические волокна с

брэгговскими решетками и без них. С использованием обоих типов волокон получены химические спектры высокоэффективной эпоксидной смолы. Измерения температуры и механических напряжений выполнялись с использованием одномодовых волокон с брэгговскими решетками, а затем сопоставлялись с данными, полученными обычными методами. В результате было продемонстрировано исключительно точное соответствие. Дальнейшая работа в этой области направлена на создание более устойчивого химически чувствительного участка волокна, способного лучше выдерживать неблагоприятную среду затвердевающего композита.

3.3. Разработка микросистем активного управления аэродинамическим потоком

Базовыми предметными областями механотроники являются совокупные механические и электрические свойства, электроника приводов, алгоритмы и аппаратная часть вычислительных систем управления, импеданс датчиков и интерфейсов в контексте адаптации и оптимизации проектируемых устройств для конкретных функциональных применений. В рамках совместной программы DARPA и NASA по созданию конструкций с переменной геометрией – Morphing Program – разрабатывается ряд интеллектуальных приводных устройств для активного управления аэродинамическими потоками и с применением принципов механотроники и микросистемной техники. Среди них – исполнительные механизмы синтетических сопел и устройства оперативного регулирования завихренности. Сочетание механотроники с более эффективными пьезоэлектрическими исполнительными механизмами, новыми технологиями закладных деталей и методами адаптивного регулирования в совокупности со схемой оптимизации системного уровня способно в сумме позволить достичь революционного повышения эффективности и безопасности авиакосмической техники.

В последнее время активно ведутся исследования по созданию исполнительных механизмов для управления срывом потока по профилю без потерь массы в синтетических реактивных соплах. Отсутствие потерь массы означает, что количество всасываемого и выпускаемого воздуха одинаково. Одной из множества сложностей при разработке синтетических сопел,

которая стоит перед инженерами, является обеспечение необходимого импульса для воздействия на поток над аэродинамическим профилем при высоких числах Рейнольдса.

3.4. Автономное управление полетом с применением жидкостных исполнительных элементов

Другая часть исследований в рамках программы Morphing Program направлена на решение задач управления на пути к цели использования интеллектуальных приводов и жидкостных исполнительных элементов для локального управления аэродинамическим потоком и глобального контроля полетных характеристик. Наиболее важными являются следующие актуальные задачи: как определить схему размещения жидкостных исполнительных элементов на поверхности самолета или космического аппарата и как применять подобные радикально новые исполнительные элементы в системе управления для непосредственного маневрирования аппаратом и управления его полетом.

При исследовании средств управления в рамках программы Morphing Program подобные задачи пытаются решать на динамической имитационной модели, применяя массивы универсальных приводов изменения геометрии в концептуальной конфигурации самолета под названием ICE (новаторские исполнительные элементы управления – Innovative Control Effectors).

В свою очередь, NASA использует проект ICE в качестве образца конфигурации по соглашению о сотрудничестве с корпорацией Lockheed Martin. Массивы исполнительных элементов реализованы в системе управления в дискретизованной форме: каждое изменение геометрии, моделируемое как небольшой скачок, представляется либо полностью включенным, либо полностью выключенным элементом массива, а для получения более существенных усилий элементы по мере необходимости объединяются. Подобные массивы позволяют системе управления стабилизировать и осуществлять маневрирование аппарата без применения обычных подвижных поверхностей, таких как элероны или рули. Однако прогнозируемая степень воздействия этих исполнительных элементов по-прежнему

весьма мала по сравнению с рулем или элероном, поэтому система управления выполняет лишь относительно плавные маневры.

Дальнейшие исследования направлены, главным образом, на экспериментальную проверку правильности действенности различных исполнительных элементов управления аэродинамическим потоком и на применение крупных массивов взаимодействующих элементов для решения задачи автономного управления полетом.

3.5. Использование иономеров для создания самовосстанавливающихся композитов

Одно из базовых направлений исследований DARPA при создании самовосстанавливающихся материалов сосредоточено на использовании доступных на широком рынке материалов (Surlyn 8920). Также изучаются такие структуры, как самовосстанавливающиеся иономеры на фторполимерной основе (материал Nafion компании DuPont) которые крайне гигроскопичны, не имеют потенциальных ограничений для применения в конструкциях авиационных и космических аппаратов, однако требуют особых лабораторных методов.

За счет использования иономеров в самовосстанавливающихся композитах удастся наслаивать ленту из оксида алюминия, создавая керамикополимерные композиты. Лента из оксида алюминия производится методом поточного наплавления порошковой суспензии на гибкую подложку с последующей термообработкой для удаления технологических материалов и частичного спекания ленты. В настоящее время ведутся испытания ряда технологий для введения полимеров в наслоенные керамические ленты, включая просачивание расплавов и растворов, а также полимеризацию *in situ*. Применимость метода просачивания расплава ограничивается высокой вязкостью. Полимеризация *in situ* исследована сравнительно мало, но является весьма перспективной технологией с точки зрения уменьшения объема пор. Первые механические испытания показали, что введение полимера в наслоенные структуры защищает композит от повреждения во время высокоскоростной механической обработки.

4. ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И СИСТЕМ В АВИАЦИИ

ТРАДИЦИОННО профилактическое обслуживание летательных аппаратов планируется на основе наработанных взлетов, посадок, налетанных часов и полетных событий с крутильной нагрузкой. В дальнейшем эти показания сопоставляются с единым нормативом, рассчитанным с консервативным запасом. Однако поскольку разные самолеты эксплуатируются в неодинаковых летных условиях, такой подход ведет к неэффективному планированию обследований и замены деталей, а в отдельных случаях может являться причиной непредвиденных аварийных происшествий.

Один из способов преодоления этой проблемы заключается в использовании интеллектуальных материалов и микросистем для точного контроля эксплуатационного режима самолета, улучшения его функциональных показателей, снижения объема обслуживания и эффективного использования летного ресурса. Современные технологии компактных сенсоров в совокупности с арсеналом методов обработки сигналов позволяют операторам контролировать состояние деталей и более точно определять график обследований и замены функциональных узлов, исходя из фактического их состояния.

Следующим логичным шагом после привязки обслуживания к условиям эксплуатации является использование информации от датчиков, управляющих исполнительными механизмами различных узлов самолета, для уменьшения нагрузок и вибраций за счет ответных реакций по принципу обратной связи.

4.1. Мониторинг состояния композитных материалов

В настоящее время конструкционные композитные материалы нашли широкое применение в авиакосмической промышленности. Они обладают значительными преимуществами по сравнению с металлическими сплавами: меньшей массой, большей прочностью и более высокой устойчивостью к коррозии. Однако, одной из принципиальных особенностей композитов является характер их ответной реакции на внешние нагрузки и вибрации. В отличие от металлических конструкций, в которых процесс разрушения носит постепенный и довольно предсказуемый характер, композиты переживают дискретные разрушающие явления непредсказуемой и достаточной случайной природы. Таким образом, для контроля состояния композитных конструкций необходимы совершенно иные методы, чем для металлов.

Один из подходов заключается в использовании слоистого характера структуры композита и опирается на последние достижения в области производстве печатных плат: в структуру композита можно внедрять микросистемные датчики без существенного ухудшения общей прочности материала. В методе интеллектуальных слоев (SMART Layers) используется сочетание актуаторов и регистрирующих элементов для выявления изменений структуры композитного материала. При возбуждении композита, исполнительный элемент генерирует электромагнитную волну, по которой датчик фиксирует возможные изменения в первоначальной структуре материала. При появлении новой трещины или развитии существующей характер распространения волн меняется, и датчик регистрирует эти изменения.

Такой подход на основе технологии SMART Layers был продемонстрирован в нескольких экспериментах и показал, что внедряемые в структуру композита пьезоэлектрические интеллектуальные микросистемы способны успешно обнаруживать трещины размером до 0,1 мм.

4.2. Компенсация вибраций и циклических нагрузок

Вторая область применения интеллектуальных авиконструкционных материалов – оснащение функциональных узлов активными исполнительными механизмами, для компенсации воздействия циклических нагрузок и вибраций. В настоящее время среди всех видов летательных аппаратов к вибрациям в наибольшей степени подвержены вертолеты. При эксплуатации большинства моделей присутствуют значительные вибрации и шумы, которые ограничивают полезную грузоподъемность и скорость, а также требуют более интенсивного обслуживания при сравнительно малом ресурсе отдельных функциональных узлов конструкций. При подходе компенсации вибрации на основе интеллектуальных активных элементов их подавление осуществляется непосредственно в источнике, которым в случае вертолета является несущий винт.

Сегодня технология создания несущего винта с системой компенсации вибраций на основе использования интеллектуальных активных структур (SMART) – проект, осуществляемый корпорацией Boeing при поддержке DARPA, который ставит целью снизить вибрацию на 80%, ослабить вихревое взаимодействие лопастей при посадке на 10 дБ, повысить КПД винта на 10% и реализовать автоматическое регулирование соосности лопастей в процессе полета. При этом проект SMART подразделяется на две составляющие. Первая часть – механизм управления закрылками на основе пьезоэлектрического элемента для уменьшения вибрации в широком диапазоне частот, снижения шума и улучшения аэродинамических характеристик. Вторая часть – привод управления задним триммером на основе сплава с эффектом памяти формы, для квазистатического регулирования соосности лопастей в процессе полета.

По результатам моделирования и стендовых испытаний механизма управления закрылками были внесены конструктивные изменения, позволившие добиться значительных улучшений эксплуатационных характеристик. Предполагается, что применение недавно появившихся сборок пьезоэлектриков позволит выполнить все требования к характеристикам механизма управления закрылками. Испытания привода триммера при статических

и динамических нагрузках подтверждают соответствие всем техническим требованиям, за исключением ширины полосы частот. Прогнозируется, что последнее требование удастся соблюсти за счет улучшенных алгоритмов управления или доработкой элементов с памятью формы.

Для подавления вибраций в конструкциях вертолетов применяются и другие интеллектуальные микросистемы. Так, например, компания Eurocopter провела успешный показательный полет вертолета BK117 с пьезоэлектрическим регулятором закрылков несущего винта.

Другой подход состоит во внедрении особых устройств для адаптивного регулирования вибрации. Эти устройства при помощи пьезоэлектриков изменяют жесткость, демпфирование и (или) массу динамической системы. Хороший пример – интеллектуальная пружина, разработанная при поддержке Национального исследовательского совета Канады (NRC), и успешно апробированная в вертолете для регулирования вибраций несущего винта. Однако у нее есть и множество других потенциальных применений и в самолетах, включая адаптивные крепления двигателей и редукторов, изоляцию пола грузового отсека от фюзеляжа в грузовых самолетах и адаптивное подавление вибраций кресел. По результатам испытаний в аэродинамической трубе такому адаптивному регулятору несущего винта вертолета удалось достигнуть совокупного ослабления вибраций на 11,9 дБ в условиях переменной скорости ветра.

4.3. Системы активного подавления шумов

Третья сфера применения интеллектуальных материалов касается обеспечения комфорта экипажа и пассажиров. Правильно рассчитанное взаимодействие с конструкцией позволяет также подавлять распространение шума двигателей, пропеллеров и винтов вертолетов внутри салона. В методе активного структурного управления акустикой (ASAC) в конструктивные узлы встраиваются динамики, генерирующие встречные вибрации для подавления внешнего шума. Микрофоны, рассредоточенные по

всему фюзеляжу, непрерывно регистрируют показатели шума, а активные исполнительные устройства, закрепленные в ключевых контрольных точках, модулируют динамическую характеристику конструкции и, таким образом, существенно подавляют низкочастотный шум. Стоит отметить, что в некоторых самолетах уже применяется технология бесшумной кабины экипажа – Ultraquiet Cabin – разработка компании Ultraquiet Technologies.

Возможен и другой подход к созданию системы активного подавления шумов. В такой интеллектуальной структуре регистрирующие датчики на основе акселерометров крепятся в различных участках по длине фюзеляжа, а многослойные пьезокерамические исполнительные механизмы клеятся на сам фюзеляж. При реализации такой конструкции было достигнуто самое существенное ослабление порядка 28 дБ. Полученные результаты свидетельствуют о том, что снижение уровня шума отмечалось практически повсеместно и было наиболее выраженным в самых шумных местах салона.

Другой подход состоит в устранении шума у одного из главных его источников – турбинных двигателей. Таким образом, Boeing 747-8 может стать первым коммерческим самолетом со строенным интеллектуальным конструкционным элементом. Двигатель переменной площади, в котором при помощи сплава с эффектом памяти формы на шевронных парофилях двигателя меняется форма выпускного канала и регулируется уровень шума двигателя во время взлета. На малой высоте и скоростях повышение температуры элемент с эффектом памяти формы заставляет шевронные профили втягиваться. При этом смешиваются потоки вентилятора и внутреннего контура, открывается обход потока двигателя, в результате чего подавляются сдвиговые аэродинамические течения и снижается шум, однако ухудшается производительность двигателя. С другой стороны, при высокой скорости на большой высоте низкие температуры при эффекте памяти формы выпрямляют шевронный профиль до первоначальной формы, улучшая характеристики двигателя. Такое требование к снижению уровня шума самолетов вызвано ужесточением ограничений по уровню шума, действующих в большинстве аэропортов в крупных городах.

4.4. Управление морфингом несущих поверхностей

Четвертая область применения интеллектуальных конструкционных материалов в авиации – управление морфингом несущих плоскостей для регулирования, оптимизации или перестройки формы оболочки крыла с целью улучшения свойств поведения самолета в воздухе. В ряде проектов исследуется концепция применения материалов с памятью формы для изменения конфигурации крыла с целью воспроизведения порхания крыльев птиц и летучих мышей. Это направление едва ли принесет плоды для коммерческой авиации в ближайшем будущем, но эксперты считают это направление перспективным при создании различных классов беспилотных летательных аппаратов.

В числе упомянутых исследований – и проект Smart Wing (DARPA). Его цель заключается в изучении механизмах бесшарнирной поверхности управления закрылком в рамках нескольких серий испытаний в аэродинамической трубе, в том числе на сверхзвуковых скоростях. Результаты свидетельствуют о достижимости отклонения на угол до 20° со скоростью выше $80^\circ/\text{с}$, а также об улучшении эксплуатационных характеристик системы. Например, коэффициент крена при отклонении управляющей поверхности на 15° улучшился приблизительно на 17%.

В проекте Smart Wing также были отмечены ключевые вопросы, требующие проработки для перехода к практическому применению интеллектуальных конструкционных систем в крыльях самолетов. Среди этих вопросов – долговременная усталостная стойкость конструкции, разработка законов регулирования с обратной связью, оценка поведения в терминах аэродинамики, кинематических связей и упругости, разработка компактных источников питания и оптимизации системы. При последующих разработках с летными испытаниями беспилотного летательного аппарата модели MFX-1 массой до 45 кг, допускающего изменения конфигурации крыла в полете, продемонстрированы изменение площади на 40%, изменение размаха на 30% и изменение стреловидности крыла в диапазоне от 15° до 35° на рейсе на скоростях до 100 узлов. Летные испытания MFX-2, двухмоторного беспилотника массой 136 кг, показали

изменение площади на 40%, размаха на 73% и относительное удлинение крыла на 177%.

В настоящее время NASA исследуются и другие виды управления формой поверхности. Управление траекторией ракет исследуется группой ученых из Канадского управления оборонных исследований на базе Валькартье. Ими проведено моделирование, а также выполнены испытания в аэродинамической трубе. Другой проект, заслуживающий упоминания – адаптивный интерцептор с использованием материалов с эффектом памяти формы для ограничения околосзвукового удара. За счет изменения аэродинамического профиля крыла смягчается воздействие ударных волн при полете на околосзвуковой и сверхзвуковой скоростях.

4.5. Внедрение интеллектуальных материалов в авиации

Несмотря на то, что разнообразные исследовательские проекты успешно доказали применимость интеллектуальных технологий в авиации, до их реализации на практике дело пока не дошло. По-прежнему необходимо решить, закрыть или тщательно проработать множество технических вопросов, связанных с исключительно жесткими и строгими стандартами авиации. С другой стороны, хотя некоторые из существующих стандартов возможно перенести на интеллектуальные конструкции, они не учитывают в должной мере всех особенностей этой перспективной технологии, например характеристик и надежности таких материалов, а также всех технологических аспектов производства интеллектуальных композитов. Отправной точкой при внедрении любых из этих новых технологий должно стать выполнение требований полетопригодности с последующей сертификацией конкретного летательного аппарата. Прежде чем эта технология сможет отвечать всем требованиям безопасности, потребуется куда больше теоретических, технологических и числовых проверок, а также экспериментальных испытаний.

Практическое освоение сдерживается и тремя проблемами нетехнического характера. Во-первых, по своей сути интеллектуальные конструк-

ции лежат на пересечении множества научных и технических дисциплин, что косвенно приводит ко второй проблеме – объединению всех этих новшеств, требующему взаимодействия и затрат времени. Третья проблема связана со стоимостью внедрения этих интеллектуальных материалов в самолето- и вертолетостроении, что пока лишь грозит существенным удорожанием систем с утратой их привлекательности для потенциальных эксплуатантов. Наконец, распространение новой технологии среди массовых эксплуатантов также займет время. Проводя параллели с внедрением других технологий, можно отметить, что на внедрение композитных материалов в авиакосмической промышленности, где они сегодня применяются широко, ушло порядка 50 лет.

5. ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР

НЕСМОТРЯ на впечатляющие начинания в сфере интеллектуальных материалов и конструкций, эта сфера остается исследованной лишь поверхностно. Сегодня DARPA выделяет средства на те направления исследований, которые прямо или косвенно повлияют на сферу интеллектуальных материалов. Программы в области бионических материалов и конструкций, новых многофункциональных материалов и новых материалов исполнительных механизмов и устройств станут неоценимо полезны для раскрытия полного потенциала интеллектуальных материалов и конструкций. Кроме того, начата работа над созданием мощных аналитических инструментов для вычислений на основе начальных принципов, которые позволят «с нуля» рассчитывать и разрабатывать материалы с заданной нестабильностью решетки для создания уникального передающего механизма.

Как описано выше, настоящий интеллектуальный материал способен определять внешние воздействия и реагировать на них изменением своих свойств. В природе мы находим много примеров интеллектуальных материалов и конструкций. В некотором смысле венцом творения конструкторов интеллектуальных материалов мог бы стать материал, обладающий естественными характеристиками мышц. Наиболее очевидным применением «мышцеподобного» материала стали бы подвижные узлы робототехники. В основе передвижения всех животных организмов, от простого таракана до человека, лежат локально описываемые траектории. Например, тараканы способны очень быстро и безошибочно бегать по поверхностям со сложным резным рисунком. Это связано с тем, что таракан

передвигается по принципу маятника: его центр тяжести автоматически смещается так, чтобы уравнивать перемещение тела.

Учеными DARPA достигнуты значительные успехи в создании биомиметических роботов, передвигающихся по этому принципу. Одному такому роботу, RHex, удалось впечатлить военных. Однако создание робота, по-настоящему двигающегося и действующего на основе биологических принципов, немыслимо без полноценного воспроизведения динамики мышц. Например, прежде, чем человек осознает, что переступил с грунтовой дороги на песок, его ноги уже успеют отреагировать и адаптироваться. Это связано с тем, что система обратной связи для биологического передвижения в значительной мере сосредоточена в самих мышцах. Мышцы – это не только приводы, но и они датчики, выдающие локальную информацию о положении. Мышцы играют и конструктивную роль: они принимают на себя массу и действуют как пружина и демпфер. По сути, мышца – это комплекс из множества микросистемных живых устройств.

Существенные механические напряжения, на которые способны мышцы, требуют отхода от традиционных материалов исполнительных механизмов типа пьезокерамики в пользу более податливых материалов. В связи с этим DARPA проводит программу электроактивных полимеров. Одной из ее главных целей является разработка мягких полимерных приводов для перспективной робототехники. Механическая функциональность многих разработанных концепций электроактивных полимеров зависит от ионообменных процессов в воде, затрудняя их «упаковку» в готовые блоки. Трудность состоит также в недостаточной скорости диффузионного переноса ионов в толще материала, даже при скромной частоте, требуемой для мышечных сокращений – 10–100 Гц. Как ни странно, хорошо себя показали более жесткие полимерные системы, работающие с приложением высоких напряжений. Самые успешные из них продемонстрированы в робототехнике в рамках программы многофункциональных материалов DARPA.

Мышцы млекопитающих – не единственный чувствительный материал, который можно встретить в природе. Движения присущи и растениям, будь то поворот вслед за движением солнца или захват добычи растением-

хищником. Эти движения выполняются путем модулирования давления жидкости в структурных клетках диаметром 10–100 мкм. Этот механизм отчасти схож с гидростатическими усилиями гелеобразных электроактивных полимеров, но благодаря малым расстояниям переноса в этих настических структурах возможно весьма малое время реагирования. Они также позволяют развить значительное усилие при давлениях порядка 1,4 МПа. Если эти распределенные гидравлические системы удастся реализовать в крупном масштабе, то сможет увидеть свет и новое поколение мощных механических систем с большим развиваемым усилием.

Настические структуры по своему поведению схожи с материалами с памятью формы, будучи способны к быстрому срабатыванию только в одном направлении. Это не помеха для растения-хищника, которому достаточно захватить жертву, но применение подобных материалов на замену обычной гидравлике требует поиска иных подходов к настическим структурам. В перспективе планируется исследовать эти явления на пути к разработке синтетической настической структуры. В числе предполагаемых тем исследований – изготовление мембран, подобных стенкам клеток, с присущей способностью переноса жидкости, развитие возможностей по созданию сетей управляемых клеток и выработка соответствующих стратегий управления для оптимальных характеристик.

Биомиметические подвижные и чувствительные интеллектуальные материалы – это лишь первый шаг. Чтобы отвечать своему названию и стать по-настоящему интеллектуальными, материалы должны знать свою окружающую среду и быть в состоянии адаптироваться к ней для обретения оптимальных характеристик. Хотя такое описание может показаться мистическим, работа в этом направлении уже идет. Существуют концепции создания материалов, способных изменять свои упругие свойства в ответ на изменение окружающей среды, а также самовосстанавливающихся материалов. DARPA поддерживает ограниченные работы в последнем направлении и рассматривает возможность расширения работ в первом.

РЕДАКТОРЫ



Московский физико-технический институт (государственный университет) (МФТИ) осуществляет подготовку специалистов высшей квалификации в различных областях современной науки и техники.

Приоритетные направления МФТИ включают: «Прикладные математика и физика», «Системный анализ и управление», «Информатика и вычислительная техника», «Живые системы» и другие. Основателями института являются лауреаты Нобелевской премии П.Л.Капица, Н.Н.Семенов, Л.Д.Ландау. С самого момента своего основания в 1951 году в МФТИ используется оригинальная система подготовки научных работников, получившая широкую известность как «система Физтеха». В октябре 2009 года МФТИ по результатам конкурса был удостоен статуса Национального исследовательского университета.

Максим Алёхин, научный сотрудник МФТИ. Выпускник факультета «Биомедицинская техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. С 2011 г. – н.с. лаборатории суперкомпьютерных технологий Iscalare МФТИ.

Илья Клабуков, старший научный сотрудник МФТИ. В 2009-2010 гг. – зам. декана факультета радиотехники и кибернетики МФТИ, зам. начальника группы вооружений, военной и специальной техники МФТИ. С 2011 г. – с.н.с. лаборатории суперкомпьютерных технологий Iscalare МФТИ.

Сергей Мусиенко, руководитель Геномного проекта МФТИ. Выпускник МФТИ и МГИМО. Окончил Singularity University в Кремниевой долине. В 2008-2011 гг. – зам. директора Центра высоких технологий МФТИ. С 2011 г. – зам. директора лаборатории регенеративной медицины МФТИ.



При составлении сборника использовались материалы Фонда «Наука за продление жизни», Лаборатории регенеративной медицины МФТИ, Лаборатории суперкомпьютерных технологий Iscalare МФТИ, отчеты по исследовательским программам NASA и DARPA, а также другая информация в свободном доступе из открытых источников.

Сайт проекта «Индустрия человека»:
www.living-industry.ru

E-mail:
defensenetwork@gmail.com



NASA 2025 Aircraft Program



Lockheed Martin (NASA 2025 Aircraft Program)



Lockheed Martin (NASA 2025 Aircraft Program)



Lockheed Martin (NASA 2025 Aircraft Program)



X-51A Waverider



X-51A Waverider



NASA Hyper-X Program



X-43A



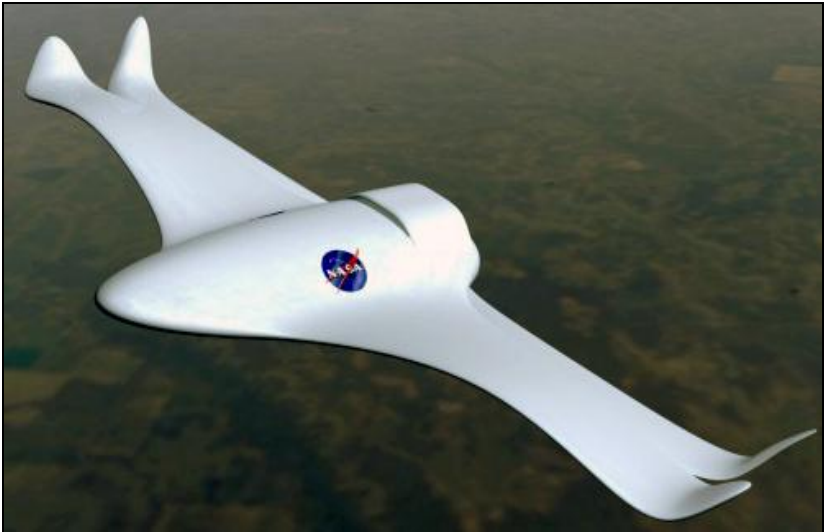
DARPA Falcon HTV-2



DARPA Falcon HTV-2



Supersonic bi-directional (SBiDir) flying wing (FW)



NASA Morphing Aircraft



X-53 (Active Aeroelastic Wing)



X-48B



Ty-2000



T-4MC («200»)

Все, что можно представить, –
можно осуществить.



www.sky-shell.ru