

*Д.В. Сиваков, И.Н. Гуляев, К.В. Сорокин,  
М.Ю. Федотов, В.А. Гончаров*

## **ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИНТЕГРИРОВАННОЙ АКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ АКТЮАТОРНОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКОВ**

*Рассмотрены различные типы пьезоэлектрических актюаторных элементов (АЭ) и основные аспекты технологии интегрирования твердотельного актюатора в полимерный композиционный материал (ПКМ) с целью изменения геометрии профиля поверхности и жесткости материала конструкции в процессе эксплуатации, а также различные типы электрического соединения АЭ, введенных в структуру ПКМ.*

**Ключевые слова:** *композиционный материал, пьезоэлектрик, активная структура, электромеханическая актюаторная система.*

Возможность изменения геометрии поверхности или жесткости материала конструкции в процессе эксплуатации – перспективное направление исследований. Использование интеллектуальных материалов с активной структурой, где изменение характеристик материала или его геометрических характеристик происходит благодаря структурной анизотропии или функциональным элементам, которые при воздействии внешних факторов изменяют характеристики материала, а при снятии воздействия возвращаются в исходное состояние, в будущем позволит создать летательные аппараты с иными режимами и возможностями полета [1].

Актюаторы – исполнительные элементы, которые служат для управления параметрами материала или конструкции (напряженно-деформационное состояние, геометрический профиль) в режиме реального времени с помощью электрических, электромагнитных и других сигналов и воздействий. Применение в качестве систем актюирования встраиваемой в структуру композиционного материала пьезоэлектрической керамики связано с использованием пьезоэлектрического эффекта, т. е. способностью материала давать электрический отклик на знакопеременные нагрузки. Наличие прямого и обратного пьезоэффектов обеспечивает значительные преимущества пьезоэлектрических компонентов при создании интеллектуальных материалов [2]. В составе интеллектуального материала пьезоэлектрические компоненты могут выполнять функции сенсоров и активных элементов, управляющих напряженным состоянием материала. При этом среди сегнетоэлектрических керамик наибольшее применение нашла керамика на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС (PZT)), как обладающая наибольшими возможностями трансформации энергии при минимальном ее потреблении.

В настоящее время актюаторы получают в виде различных форм – жесткие и гибкие монолитные пьезопластины, MFC актюаторы (Micro-Fiber Composite), в том числе многослойные композиционные (пакетного типа), пьезоэлектрические фрикционные демпферы и т. д. При этом основными направлениями применения актюаторов являются внешние – например, накладки, присоединяемые к поверхности высоконагруженных участков конструкции с минимальной модификацией первоначальной конструкции, или внутренние, т. е. вводимые в структуру материала, из которого изготовлена конструкция. Применение в конструкции материала на основе пьезоэлектрических актюаторов позволит решить проблемы снижения вибрации вертолетов (фюзеляжа, ло-

пастей), шума, улучшения их летных характеристик, позволит контролировать нагрузку на лопасти путем изменения формы профиля под действием активной системы управления или, например, в крыле самолета с изменяющейся конфигурацией и профилем – в зависимости от высоты и скорости полета с целью оптимизации подъемной силы [3].

Выделяют основные и побочные направления актюирования. Под основным направлением актюирования понимается такое направление изменения геометрии актюатора, в котором эти изменения максимальны. Оставшиеся направления считают побочными. Для снижения влияния побочных направлений актюирования применяют укладку материала, обладающего более высоким модулем Юнга в этих направлениях. Компоновка актюаторной системы сводится к выбору электрического соединения актюаторных элементов, их геометрического расположения и основного направления актюирования.

Особенностями и основными задачами, которые необходимо решить при изготовлении конструкционных элементов из ПКМ и интегрируемыми в его структуру пьезоэлектрическими актюаторами, являются, в первую очередь, процессы выбора и подбора полимерной матрицы и расположения актюатора в структуре композита.

Изделия из волокнистых композиционных материалов получают в основном методами автоклавного и прямого формования, но также могут применяться методы пресскламерного формования, формования по технологиям RFI (процесс вакуумной инфузии, вакуумной инъекции или вакуумного формования), RTM (способ пропитки путем инъекции смолы в форму) и др. Формование композиционных материалов – независимо от используемого способа – осуществляется по режиму, подбираемому на основе исследований связующих и препрегов. В зависимости от используемого оборудования, геометрии формируемого изделия и способа формования – температурно-временной режим может быть скорректирован. При этом основными технологическими факторами, влияющими на формообразование и реализацию структуры композита, являются температурное воздействие (до 300–350°C), удельное давление формования (от 0,1 до 1,0 МПа) и длительность цикла формования.

В волоконных композиционных материалах большую роль играет так называемый межфазный слой (на границе раздела армирующего наполнителя и матрицы) и непрерывность его распределения по поверхности армирующего наполнителя – для обеспечения монолитности композиционного материала в целом [4]. Вследствие значительного различия характеристик жесткости армирующих волокон и полимерной матрицы, свойства однонаправленных материалов в значительной степени зависят от искривления волокон и отклонения их от направления действия нагрузки. Одним из важнейших факторов получения монолитного интеллектуального углепластика является создание границы раздела компонентов полимерного материала с актюатором – для минимизации его влияния на свойства ПКМ. Использование различных по химической природе материалов в составе ПКМ с различными значениями ТКЛР может приводить к возникновению высоких внутренних напряжений и дефектных областей (расслоений, трещин) в композиционном материале как в процессе его изготовления, так и при эксплуатации. Для создания полимерных композиционных материалов могут применяться матрицы на основе как термопластичных, так и терморезистивных смол – при этом для изготовления конструкционных элементов в авиации применяют в основном терморезистивные матрицы. Однако большинство терморезистивных матриц, обладая более высокими прочностными характеристиками, имеют низкие деформационные свойства. Поэтому при подборе полимерной матрицы необходимо учитывать не только возможность адгезии полимерного связующего к поверхности пьезоэлектрического актюатора, но и возможность матрицы к упругому деформированию (без разрушения) актюатором

в процессе приложения электрического поля без потери упруго-прочностных свойств в составе композита.

Другим аспектом технологии интегрирования в композиционный материал твердотельного актюатора является влияние толщины актюатора и смещение (искривление) волоконного армирующего наполнителя в зоне актюатора. Особенностью ПКМ на основе волоконных наполнителей является высокая степень анизотропии упругих и прочностных характеристик. Регулирование свойств материала достигается перекрестным расположением волокон, а ориентация волокон в изделии или конструкции определяется условиями их нагружения. Введение актюаторов в структуру композита может приводить к искривлению армирующих волокон вблизи него и снижать его упруго-прочностные свойства. Поэтому важно минимизировать размеры актюатора. Основным материалом для пьезоэлектрического актюатора является сегнетоэлектрическая керамика, имеющая ограничения по получению минимальных по толщине пластин (от 0,1–0,2 мм). Пьезокерамические актюаторы изгибного типа, выполненные в виде биморфных (состоящих из двух пьезоэлементов) и тетраморфных (состоящих из четырех пьезоэлементов) структур, обладают перемещением до нескольких сот микрометров, но имеют низкий порог блокирующих нагрузок, при которых не происходит актюирования при максимально допустимом подаваемом на актюатор напряжении. Многослойные же актюаторы обладают перемещением, не превышающим десятки микрометров, а блокирующие нагрузки достигают сотен килограмм на см<sup>2</sup>. При близком соотношении толщин волоконного армирующего наполнителя и актюаторного элемента, актюаторные элементы могут быть выложены на армирующие волокна в соответствии с электрической схемой: если толщина актюаторного элемента больше толщины армирующего наполнителя, то необходимо делать технологические отверстия, удаляя часть армирующего наполнителя. Количество слоев с технологическим отверстием под закладку актюаторного элемента рассчитывают путем деления толщины актюаторного элемента на толщину монослоя пластика.

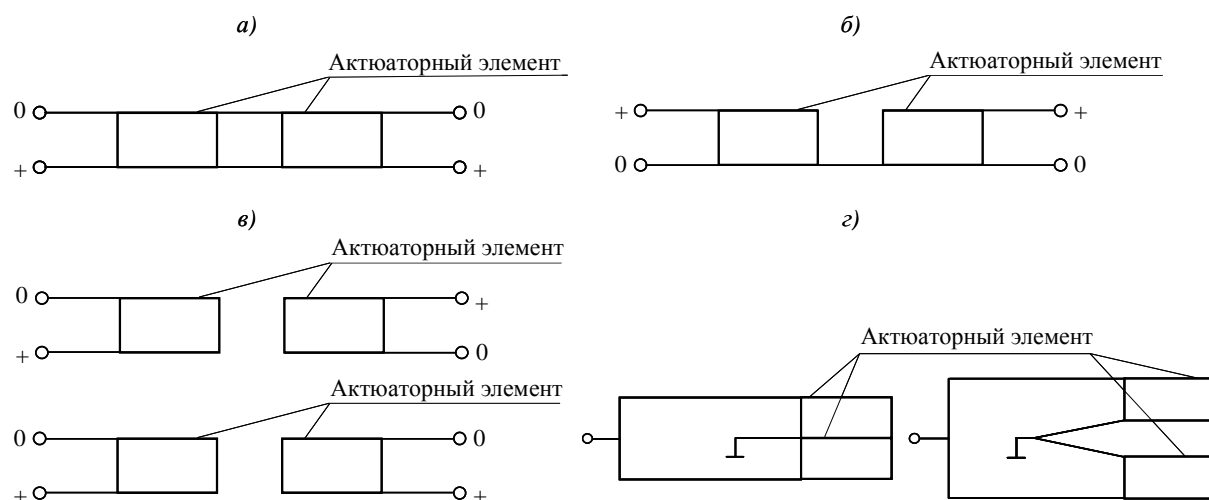
«Чистые» керамические пьезоэлектрики отличаются высокой хрупкостью и малой деформативностью, что ограничивает возможность их применения. Для получения максимального эффекта трансформаций и перемещений от использования актюаторов в составе конструкции из композита, актюаторный элемент должен иметь определенную анизотропию, что может быть достигнуто путем применения сложных композиционных актюаторов, состоящих из слоев, волокон или пленок пьезокерамики, совмещенных с полимерной матрицей.

Для управления актюатором необходимо решить вопрос о создании и расположении контактной группы, позволяющей подавать управляющее электрическое воздействие на актюатор, а также при использовании электропроводящего материала (углепластика) системы диэлектрической защиты.

Пьезоэлектрический актюатор в своей структуре имеет электропроводящие контакты и электрические проводники, поэтому одним из самых главных требований, предъявляемых к актюаторам, является их электроизоляция. Для органопластиков и стеклопластиков изоляция проводников не требуется, в углепластике является обязательным применение диэлектрической изоляции либо покрытия, обладающего при этом хорошими адгезионными характеристиками. Возможно использование гибридных конструкций, где в качестве изоляции электрических проводников используются монослои из органика или стеклоткани. Также надежную электроизоляцию можно обеспечить путем нанесения расплава либо раствора связующего с последующей термообработкой.

Для возможности изменения профиля поверхности актюаторный элемент необходимо располагать со смещением относительно осевой плоскости ПКМ. При размещении в

ПКМ двух или более актюаторных элементов учитывают их полярность. Располагать одноименные полюса следует с одной стороны. Компоновка актюаторной системы зависит от выбранной схемы электрического соединения актюаторных элементов.



Электрическое соединение актюаторных элементов с возможностью подачи синфазных сигналов одного (а) и разного (б) уровней, синфазных и парафазных сигналов разного уровня (в) и мостовое соединение (г)

На рисунке представлены типы электрического соединения актюаторных элементов с возможностью подачи синфазных сигналов (см. рисунок, а, б), синфазных и парафазных сигналов разного уровня (см. рисунок, в), мостового соединения (см. рисунок, г) с возможностью подачи парафазных сигналов одного уровня.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой //Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 3–6.
2. Уорден К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. М.: Техносфера. 2006. 223 с.
3. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера. 2006. 628 с.
4. Бунаков В.А., Головкина Г.С. Армированные пластики. М.: МАИ. 1997. 404 с.