

## Умные материалы и конструкции: фантастика или реальность?

Юрлова Н.А.

Статья посвящена новой междисциплинарной области механики сплошных сред – smart-материалам и конструкциям: истории их появления, особенностям создания и принципам их работы, возможностям использования на практике.

**Н**а протяжении длительного исторического периода материалы человеком скорее использовались, чем создавались. Инструменты изготавливались, убежища строились из доступных материалов, но при этом фундаментальная природа этих материалов не изменялась. По мере развития цивилизации возникла потребность, а затем и способность создавать материалы, которые бы удовлетворяли определенным требованиям. Так появились бронза, сталь, окрашенная ткань, керамика и т.д. Для каждого из этих материалов исходное сырье компоновалось и/или обрабатывалось таким образом, чтобы получился новый материал с особым набором необходимых свойств.

Стремительное развитие физических наук в двадцатом веке дало обширную теоретическую базу для объяснения свойств существующих природных и создания новых искусственных материалов, а появление мощных компьютеров позволило преобразовать эту базу в различные методологии практического конструирования и производства новых материалов.

Отличительной чертой человечества было его стремление управлять условиями окружающей среды для того, чтобы сделать жизнь более комфортной. На протяжении почти всей истории ключевым элементом этого управления было само человечество. По мере того как создавались все более и более сложные механизмы и конструкции, стала очевидной потребность в управлении небиологическими механизмами в зависимости от состояния окружающей среды в автоматическом режиме – без участия самого человека. Одним из примеров ранней системы такого управления, подстраивающегося под требования окружающей среды, был морской якорь, который использовался для удержания парусных судов в одной точке на волнах при спущенных парусах в штормовую погоду.

Вплоть до девятнадцатого столетия машины основного пользования и системы управления, связанные с ними, имели ограниченную сложность. Когда во время промышленной революции произошло стремительное развитие больших и мощных машин, одновременно стали создаваться механические адаптивные элементы управления. Простым примером такого управления является выпускной клапан для предохранения паровых двигателей от достижения предельных параметров давления и взрыва. В настоящее время область адаптивного управления расширилась весьма быстро, в основном за счет изобретения компьютера. Сложные модели механических систем теперь могут использоваться для определения и реализации законов управления.

Вследствие своей зависимости от цифрового компьютера исследования в области адаптивного управления могли возникнуть только в современную эпоху. Начиная со

---

второй половины XX века ученые начали искать пути создания электронных приборов, которые могли бы решать задачи способами, подобными тем, что использует человек. Тогда казалось, что такие приборы должны обладать «искусственным интеллектом». Цифровой компьютер, изобретенный в то время, изначально был плохо приспособлен для подобного типа исследований. Алгоритмы первых компьютеров отражали их внутренние фиксированные архитектуры и использовали линейную последовательную обработку данных. Алгоритмы программировались с помощью основных рабочих инструкций компьютера, на машинном языке, и были направлены на обработку больших массивов численных данных. С целью использования компьютера как инструмента для реализации искусственного интеллекта были разработаны символьные языки высокого уровня и созданы новые архитектуры параллельных, обладающих нейробиологическими возможностями компьютеров (и алгоритмов). Следствием этого стали системы, основанные на компьютерах, которые использовали рекурсивные нелинейные методики для адаптации и переконфигурирования самих себя в зависимости от изменений окружающей среды (от входных данных).

Основная идея всей технологической эволюции, ведущей к возникновению smart-конструкций, – это идея адаптации. Одной из главных характеристик таких конструкций является то, что они адаптируются к изменяющимся условиям. Адаптивные материалы, адаптивные вычисления и адаптивные системы управления – все они представляют полноправные области в рамках исследований smart-конструкций.

В общем случае smart-конструкции должны включать в себя элементы, изготовленные из определенных материалов, которые обеспечивают способности:

- изменять свойства всей конструкции в целом под действием внешних полей различной физической природы (электрических, магнитных, температурных и т.п.);
- оценивать данные о состоянии объекта и принимать решение о действии (посредством вычислительных методов, разработанных в рамках исследований таких конструкций);
- определять и выполнять правильное действие (на основе знаний или соответствующих законов управления).

Способность к адаптации возникает не только на самом высоком уровне организации конструкции, она может также присутствовать на уровнях основного материала, из которого изготовлены элементы конструкции.

В техническом сообществе имели место обширные дискуссии по ряду вопросов, касающихся smart-материалов и smart-конструкций, а именно: что это такое; могут ли smart-материалы рассматриваться как подмножество smart-конструкций; одно и то же smart-конструкция и интеллектуальная конструкция и т.д. [3, 22, 24, 25]. Эта дискуссия как подпитывается, так и заводится в тупик техническим сообществом вследствие по-настоящему междисциплинарной природы этой новой области. Исследования smart-материалов и конструкций включают в себя так много технически различных областей, что для одной области стало почти типичным полное непонимание терминологии и текущего состояния дел в других сферах.

Зафиксированы различные термины: интеллектуальные, разумные, адаптивные, активные, чувствительные, метаморфные конструкции и/или материалы и/или системы.

Если строго следовать словарным определениям, то очевидно, что интеллектуальный, разумный, адаптивный и т.д. являются различными по смыслу прилагательными. *Интеллектуальность* подразумевает способность мыслить абстрактно и применять старые уроки к совершенно новым ситуациям, в то время как *разумность* означает способность собирать знания и использовать их правильным образом. *Чувствительность* означает способность собирать информацию и быть осведомленным о том, что она собирается, но это не предполагает способности учиться на основе этой информации и принимать решения. *Интеллектуальность* и *разумность*, вообще го-

воря, описывают умственную деятельность; а *адаптивный, активный и метаморфный* «отвечают» за физическую активность. Различие между этими терминами заключается, в основном, в типе деятельности. *Активный* просто означает, что происходит физическая активность, в то время как *адаптивность* подразумевает, что результатами деятельности являются только изменения существующей конфигурации. *Метаморфный*, в свою очередь, означает серьезные преобразования. Что касается терминов *материал* и *структура*, то они, по-видимому, отличаются только масштабом. И, наконец, – *система*, которая подчеркивает коллективность компонентов, работающих вместе для достижения общей цели, при этом ее компоненты по отдельности могут иметь цели, отличающиеся от коллективной.

Следует отметить, что термины *разумный, интеллектуальный* или *адаптивный* зачастую широко используются для описания одного и того же уровня функциональности. И ни в одном из них не говорится, как термин реализован в деталях. Например, *чувствительность* просто означает осведомленность, но не осведомленность через системы зрения, тактильные датчики и/или любую другую технологию датчиков. В последнее время стало принято считать, что интеллектуальные, разумные, адаптивные, активные чувствительные и/или метаморфные материалы и конструкции представляют совершенно *различные* системы и имеют отличающиеся атрибуты.

Smart-материалы или smart-конструкции можно охарактеризовать как системы, которые изменяют свои свойства в зависимости от изменений окружающей среды, которые они фиксируют.

Природа, как всегда, является главным источником вдохновения инженеров, что подразумевает подход к созданию технологических устройств, при котором идея и основные элементы устройства заимствуются из живой природы. По аналогии с биологическими объектами smart-системы содержат [3]:

- *чувствительные элементы*, действующие как нервная система (правый полный круг на рис. 1);
- *исполнительные механизмы*, подобные мускулатуре (левый полный круг на рис. 1);
- *устройства обработки данных в режиме реального времени*, действующие как центры по контролю за системой (нижний полный круг на рис. 1).



Рис. 1. Классификация smart-материалов, приведенная в «Concise encyclopedia of composite materials» [3]

---

На рис. 1 также показаны различные классы конструкций с точки зрения технологий. Особенно интересными представляются следующие:

- *чувствительные (пассивные) конструкции*, которые обладают структурно-интегрированной системой микрочувствительных элементов для определения состояния объекта и, возможно, окружающей среды, в которой он функционирует;
- *реагирующие smart-конструкции*, которые имеют «нервную систему» и замкнутую силовую систему автоматического регулирования для изменения свойств конструкции (жесткости, формы, положения, ориентации и скорости);
- *интеллектуальные системы*, которые способны к самообучению при адаптации.

Итак, smart-материалы представляют новую философию проектирования, которая объединяет действия датчиков, исполнительных механизмов и схемы элементов управления в одной системе, способной изменять свою реакцию в удобной форме в зависимости от изменений окружающей среды.

Такие интеллектуальные конструкции имеют перед традиционными ряд существенных преимуществ, которые обосновал Henry Petroski в своей книге «To Engineer Is Human» [14]. Он отмечал, что при проектировании опытный конструктор всегда рассматривает наихудший случай. Как результат, проект имеет большой запас прочности благодаря многочисленным усилениям, подсистемам избыточного дублирования элементов и увеличенной массе. Такой подход, конечно, требует больше естественных ресурсов, чем, вообще говоря, нужно, и расходует больше энергии для поддержания работоспособности конструкции. При таком подходе также затрачивается больше человеческих усилий на предсказание обстоятельств, при которых правильно или неправильно будет эксплуатироваться сконструированный объект. Попытки предусмотреть наихудший случай имеют более серьезный и очевидный недостаток, о котором мы время от времени читаем в газетах и слышим в вечерних новостях: невозможность предвидеть все возможные обстоятельства. «Никто не хочет учиться на ошибках, но мы не можем получить достаточно сведений от успешных решений. В отличие от популярного определения инженеров-проектировщиков как интеллектуальных консерваторов они, несомненно, действительно среди авангарда. Они постоянно стремятся использовать новые концепции, чтобы уменьшить вес и, следовательно, стоимость конструкции, делать больше с меньшими расходами, и в результате конструкция представляет собой образец эффективного использования материалов. Инженер всегда верит, что он делает что-то без ошибок, но истина состоит в том, что каждая новая конструкция может привести к новому судебному разбирательству. ... Объяснить, что пошло не так, и указать на изменения, которые сработали, намного легче, чем искать ошибки в проекте, который еще предстоит реализовать. После случившегося факта имеется полностью определенная задача для решения и демонстрации, «какие все умные». Но до этого случая нужно не только определить «загадки» проекта, но и протестировать свое «решение», проверяя все возможные способы, в которых возможно разрушение конструкции».

Это очень проницательное заявление, поскольку инженер имеет конечное количество времени и ресурсов для завершения проекта. Поэтому важно, чтобы он понимал и протестировал все возможные гипотезы о том, какие типы нагрузки, напряжений, температуры и т.д. будут встречаться в эксплуатационном режиме.

Системы интеллектуальных материалов, напротив, могут избегать многих из этих проблем. Созданные для определенной цели, они изменяют свое поведение при особых обстоятельствах. Например, перегруженная лестница, используя электрическую энергию, смогла бы предупредить человека и увеличить свою жесткость. Реакция лестницы может быть основана на фактическом опыте ее эксплуатации с учетом разрушения и старения. И, как результат, лестница, определив свое текущее состоя-

ние, тогда, когда она больше не в состоянии находиться в эксплуатации даже при минимальной нагрузке, сигнализиовала бы об этом. В некотором отношении лестница напоминает живую кость, которая перестраивает себя при изменяющихся нагрузках. Но в отличие от кости, которая начинает реагировать через минуты после импульса и тратит месяцы для того, чтобы закончить свой рост, интеллектуальная лестница изменяется за считанные секунды.

Можно было бы покрывать мосты «умными красками», которые сообщат о ветровой нагрузке или загроуженности, или здания, что позволит наблюдать за целостностью строения, подверженного нагрузкам, или даже устранять небольшие трещины сдвигом окружающего материала. Возможно изготовление специальных «чистых» комнат с активным покрытием, которое сможет собирать пыль и грязь в определенных для этого местах. Можно возводить стены, которые чувствуют вибрации и активно поглощают шум.

Но как же это можно реализовать на практике?!

Конструктивно smart-системы (материалы или конструкции) включают в себя [20] (рис. 2):

- встроенные или закрепленные на поверхности датчики;
- встроенные или установленные на поверхности исполнительные механизмы (актуаторы);
- схемы элементов управления для реализации системы контроля (позволяющие обрабатывать данные от датчиков для принятия соответствующего решения).

Датчики и актуаторы в конструкциях копируют природу в значительной степени. Сообразно нашим пяти чувствам (зрение, слух, обоняние, вкус и осязание) были разработаны визуальные/оптические, акустические/ультразвуковые, электрические, химические и тепловые/магнитные датчики. Отклики от этих первичных датчиков преобразуются в сигналы, которые передаются в центр обработки информации и блок управления (мозг) для дальнейшей обработки. В дополнение к обработке информации этот центр выполняет роль процессора, чтобы принять решение, основанное на входных данных.

Для реализации концепции smart-структур в самой простой форме наилучшим образом подходят основные материалы композитов, в которые при их изготовлении могут быть внедрены соответствующие датчики или актуаторы.

Рассмотрим основные структурные элементы smart-материалов [24].

### Датчики или сенсоры

**S**mart-структуры, имеющие в своем составе только датчики, называются пассивными. Встраивание датчиков внутрь при изготовлении композитного материала делает возможным наблюдение за внутренним состоянием материала, поэтому успешное развитие пассивных smart-структур зависит:

- от разработки и настройки пригодных датчиков;
- принципов работы датчиков и методов обработки сигналов;
- выбора подходящей схемы производства, позволяющей без больших затруднений встраивать датчики.

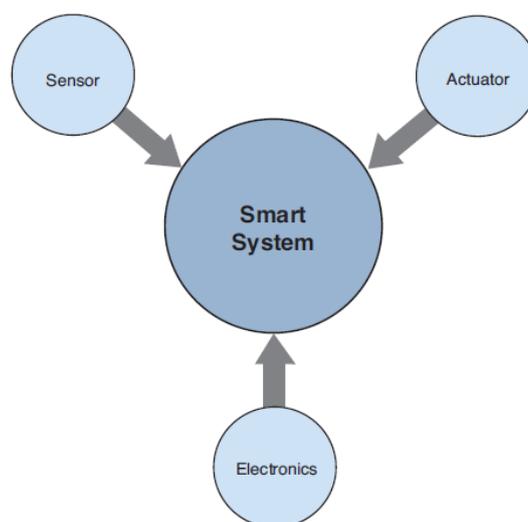


Рис. 2. Схема концепции smart-конструкции [20]

---

В настоящее время особое внимание исследователей сконцентрировано на двух типах материалов, которые наиболее удобны для встраивания в интеллектуальные системы в качестве датчиков или сенсоров, это оптические волокна и пьезоэлектрические материалы.

Датчики, основанные на волоконной оптике, могут измерять магнитные поля, деформации, вибрации и ускорение, хорошо вписываются в процесс изготовления композитного материала; способны выдерживать деформации, сравнимые с размером самого композита; обладают малыми размерами, легким весом и просты в изготовлении; невосприимчивы к электромагнитной интерференции и в жестких условиях превосходят по чувствительности другие датчики. Оптоволоконные датчики также могут быть легко интегрированы с другим оборудованием для удаленного контроля и позволяют проводить наблюдения за структурой композита в течение всех стадий его существования: изготовления, тестирования и эксплуатации; стойки к агрессивной окружающей среде и нечувствительны к электрическому и магнитному шуму; имеют широкую полосу частот отклика.

Оптоволоконные датчики хорошо себя зарекомендовали как при полном встраивании в материал, так и при внешнем закреплении. Встраивание оптического волокна влечет за собой необходимость внесения изменений в технологический процесс изготовления композитных материалов для того, чтобы расположить датчики строго в требуемых местах и быть уверенными, что сигналы от них могут быть введены и выведены через проводники. Для того чтобы быть пригодным к использованию, волоконный датчик должен:

- вызывать минимальные отклонения от заданного распределения упрочняющих волокон в композитном материале;
- по возможности не снижать механические свойства композита;
- не допускать чрезмерного ослабления сигнала и не разрушаться в процессе встраивания, иначе будет невозможно провести необходимые измерения;
- иметь подходящие средства для ввода и вывода лазерного света в систему через проводники.

Широкое применение пьезоэлектриков в качестве датчиков обеспечили их достоинства:

- широкая полоса частот;
- возможность использования очень тонких слоев пьезоэлектрика при закреплении их на поверхности или при встраивании внутрь материала (композита);
- отсутствие запаздывания регулирующего воздействия;
- механическая простота.

В последнее время чаще всего в качестве датчиков вместо пьезокерамики применяются пьезоэлектрические полимеры, такие как флуорид винилидена (polyvinylidene fluoride – PVDF), которые могут быть закреплены на поверхностях любых типов и любой, даже сильно искривленной, геометрии. Такие датчики способны повторять возможности человеческой кожи, определяя геометрические характеристики, такие как края и углы, температуру или различая разные материалы. Так, чувствительность полосок PVDF является достаточно высокой для того, чтобы различать шрифт в книгах для слепых и сорта наждачной бумаги.

## Актуаторы (исполнительные механизмы)

**Д**ля изготовления управляемых или реагирующих smart-структур (то есть активных или активно-пассивных) необходимы актуаторы или исполнительные механизмы, которые способны вызывать деформацию конструкции, опираясь на полученную от датчиков информацию, описывающую физическое состояние системы.

В настоящее время в качестве актуаторов применяют:

- сплавы с памятью формы;
- пьезоэлектрические материалы;
- электрострикционные материалы;
- магнитострикционные материалы;
- электрореологические жидкости.

Несмотря на кажущуюся фантастичность, smart-системы (материалы или конструкции) уже нашли применение в реальной жизни, причем неожиданно многочисленное и разнообразное. Например, это простые пьезоэлектрические громкоговорители, механизмы извлечения карт для переносных компьютеров, механизмы позиционирования окуляра на сканирующих микроскопах, самозатемняющиеся автомобильные стекла, автофокусирующиеся моторы для камер, домашний спортивный инвентарь с электрорегулируемым сопротивлением, саморазворачивающиеся устройства для поддержания коронарных сосудов в открытом состоянии после ангиопластики, медицинская аппаратура формирования изображения и т.д.

Конструкции, основанные на применении smart-технологий, начинают находить применение в качестве средств уменьшения шума в кабинах вертолетов и самолетов, в промышленных нагнетателях воздуха, холодильниках и вентиляторах, для звукопоглощения при выхлопах в дизельных двигателях и в кабинах грузовиков; для демпфирования вибраций двигателей, в полуавтоматических автомобильных подвесках, радарных системах избегания столкновений и в системах безопасности, на ответственных производствах или платформах с телекамерами, для подавления вибрации дисководов в компьютерах, лопаток турбомашин и эха от подводной лодки, для контроля формы и демпфирования колебаний космических конструкций, телескопов и т.д. Список можно продолжить, но и этого достаточно, чтобы показать всю широту возможного применения smart-конструкций.

Ранние разработки основывались на подражании внешним особенностям. Например, летающие машины Leonardo da Vinci основаны на подражании полету птиц, гладкий корпус корабля – как у рыбы, управление стабилизаторами самолетов – как у грифов. Развитие науки и технического обеспечения исследований вызвало интерес и множество новых идей, с помощью которых исследователи пытаются создать конструкции, подражающие особенностям наиболее умного из всех животных – человека.

Для эффективной борьбы с шумами в автомобиле smart-элемент улавливает вибрацию кузова, анализирует ее и приводит в действие механизм ее компенсации. Например, на пьезокерамические пластины подается сигнал, вызывающий искусственные колебания кузова в противофазе к той вибрации, которая подлежит устранению. В результате наложения двух вибраций шум гасится [10] (рис. 3).

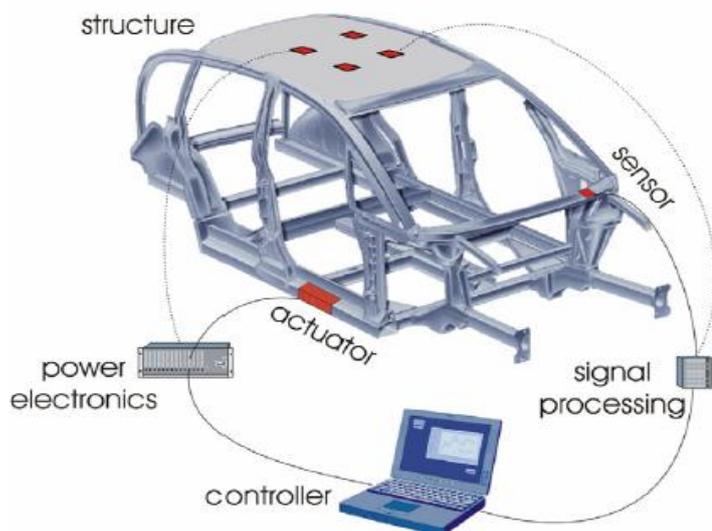


Рис. 3. Механизм подавления вибрации кузова автомобиля [10]

В Центре аэрокосмических исследований в Брауншвейге (Германия) создан композиционный материал из пьезокерамических волокон. Встроенная в кузов автомобиля пластина из такого материала, если подвести к ней электрическое напряжение, способна практически полностью поглощать звуки и тем самым играть роль щита, надежно изолирующего салон от внешнего шума. Все дело в том, что интегрированные в пластину элементы из пьезокерамики гасят звуковые колебания, если электрическое напряжение подобрано соответствующим образом. Пьезокерамические элементы без особых проблем могут быть вмонтированы в композиционный многослойный материал из углеродных волокон непосредственно в процессе его создания. Конструкторы автомобилей знают, что самым значительным источником шума в салоне являются не звуки, проникающие снаружи, и не гудение двигателя, а вибрация элементов кузова. Причем, если традиционные методы звукоизоляции еще способны кое-как справиться с внешним шумом, то против шума, вызываемого собственно вибрацией кузова, они бессильны. Между тем пьезокерамические элементы кузова могут не только с высокой точностью обнаружить источник такой вибрации и определить ее параметры, но и эффективно ее погасить.

Исследователи фирмы «Карл Шенк» в Дармштадте (Германия) предложили новый амортизатор оригинальной конструкции на основе электрореологической жидкости. В его основе субстанция, обладающая способностью изменять свою вязкость в зависимости от напряженности внешнего электрического поля, причем диапазон этого изменения весьма широк: от текучей жидкости (в отсутствие внешнего электрического поля) до желеобразной, почти твердой консистенции (при соответствующей его напряженности). При этом процесс изменения вязкости протекает строго синхронно с изменением напряженности электрического поля. Такая способность адекватно и быстро, без запаздывания, реагировать на внешние условия позволяет использовать электрореологические жидкости для высокоэффективной амортизации нежелательных вибраций.

«Умная» пьезокерамика находит применение не только в автомобилестроении, но и в авиационной промышленности. Самолетостроители используют ее для создания крыла с изменяющимся профилем. Такое крыло обретает способность оптимально приспосабливаться к аэродинамическим параметрам воздушного потока и тем самым обеспечивать более эффективное выполнение задач, стоящих перед самолетом на разных стадиях полета [1] (рис. 4).



Рис. 4. Применение smart-технологий в авиации [1]

В аэрокосмических приложениях демпфирование колебаний является сложной задачей, так как вес демпфирующих устройств должен быть как можно меньше. В литературе описано применение smart-подходов к демпфированию колебаний лопастей вертолета, подавлению нелинейного ультразвукового панельного флаттера (рис. 5) [4, 8, 17, 21].

Использование композитных материалов в сложных конструкциях, таких как высокоскоростные гражданские транспортные самолеты, средства выведения спутников на орбиту многократного использования, космические корабли, космические конструкции, бронированные машины, суда, вертолеты, ветровые турбины и другие, все более возрастает. Одним из факторов, которые ограничивают дальнейшее применение композитных материалов, является их относительно высокая восприимчивость к повреждению и, следовательно, проблемы безопасности и обслуживания. Различные типы повреждений материалов, к которым склонны композиты, включают в себя расщипывание, разрыв волокна, поглощение жидкости, ударные повреждения, разрушение матрицы, снижение прочности и жесткости при повышенных температурах, концентрацию напряжений. Таким образом, композитные материалы должны осматриваться или проверяться для обнаружения малых повреждений прежде, чем они станут катастрофическими для конструкции из-за возрастания их количества и, в результате, соединения с другими поврежденными участками [23].

Повреждения в космических, аэронавигационных, механических, инженерных и морских конструкциях часто возникают от действия таких факторов, как усталость,

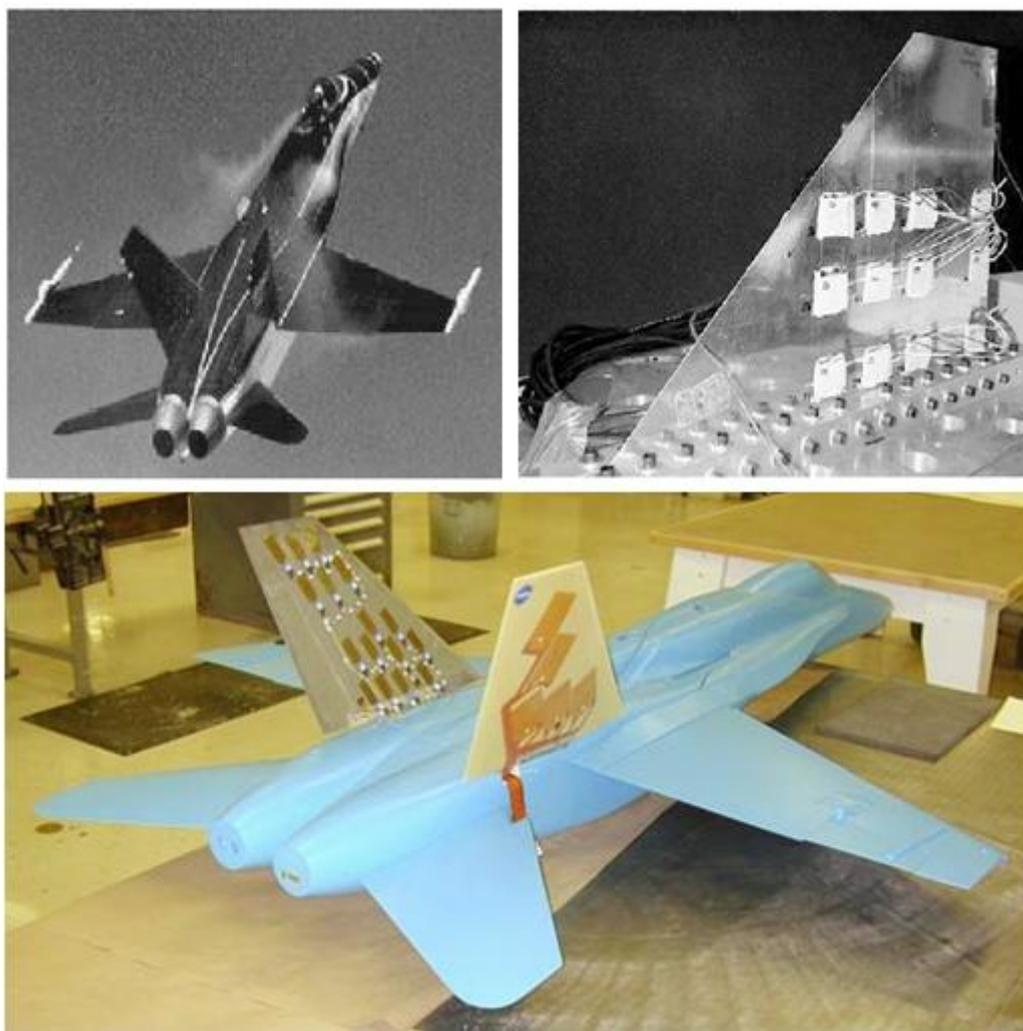


Рис. 5. Модель истребителя с макроволоконными сенсорами и актуаторами (MFC) на килевых стабилизаторах [8, 21]

коррозия и аварии. Эти повреждения, если не предпринять своевременные меры, могут возрастать с большой скоростью из-за концентрации напряжений и деформаций в окрестности повреждения, что приводит к увеличению уровня вибраций, снижению величины допустимой нагрузки, ухудшению нормальной работы элемента конструкции и даже к катастрофическому отказу. В большинстве ситуаций срок службы поврежденных компонентов может быть увеличен за счет ремонта вместо непосредственной замены. Поэтому эффективный ремонт поврежденного элемента конструкции – важная и актуальная проблема.

Эти проблемы можно решить путем применения smart-материалов для мониторинга конструкций в процессе их эксплуатации, так как они могут предоставить информацию, поступающую от системы датчиков, расположенных по месту измерения, в режиме реального времени, образуя пять уровней диагноза [18]:

- 1) обнаружение существования повреждения;
- 2) определение местоположения повреждения;
- 3) оценка величины повреждения;
- 4) обеспечение частичного саморемонта повреждения и
- 5) определение эксплуатационного ресурса конструкции.

В методиках неразрушающих оценок наличия повреждений конструкции в качестве актуаторов и сенсоров эффективно применяется пьезокерамика (PZT). По этой методике PZT-заплата, выполняющая роль актуатора-сенсора, присоединяется к конструкции. Измерением электрического сопротивления, связанного с механическим состоянием рассматриваемой конструкции, может быть обнаружено изменение в свойствах объекта, вызванные повреждением. Преимущество этой техники состоит в том, что она может осуществлять непрерывный контроль on-line; PZT-заплата является очень легкой и достаточно малой, чтобы осуществлять контроль в недоступных местах [16]. Эта методика была успешно проверена на таких конструкциях, как фермы, сложные укрепления стен, железобетонные мосты (рис. 6), трубопроводы и болтовые соединения в конструкциях [15].

В работе [23] рассматривается метод обработки сигналов для обнаружения расслоения в композитных конструкциях. В частности, для обеспечения мониторинга структуры композита в режиме реального времени применена техника вейвлет-ана-

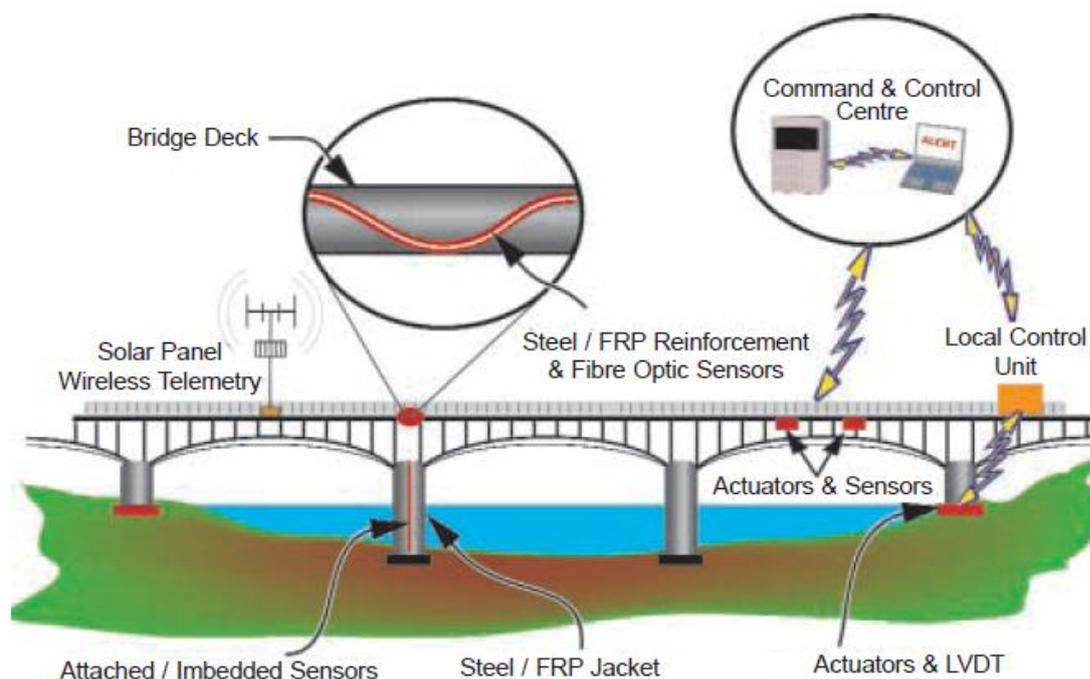


Рис. 6. Схема интеллектуального моста [10]

лиза, с помощью которой анализируется информация, поступающая с системы датчиков. Пьезоэлектрики используются для получения входного сигнала со специальной вейвлет-формой и измерения ответного сигнала. Далее ответный сигнал проходит через вейвлет-преобразование, и извлекается чувствительная к повреждениям составляющая от оригинального сигнала. Возможности метода рассмотрены на примерах расслоения при различных температурах и граничных условиях.

Данные методики широко применяются для мониторинга состояния мостов, ответственных инженерных сооружений (промышленных, исторических или высотных зданий и т.п.) или конструкций, находящихся в сейсмоопасных регионах, а также и для дефектоскопии отдельных объектов, например, для обнаружения износа вагонных колес (рис. 7) [12].

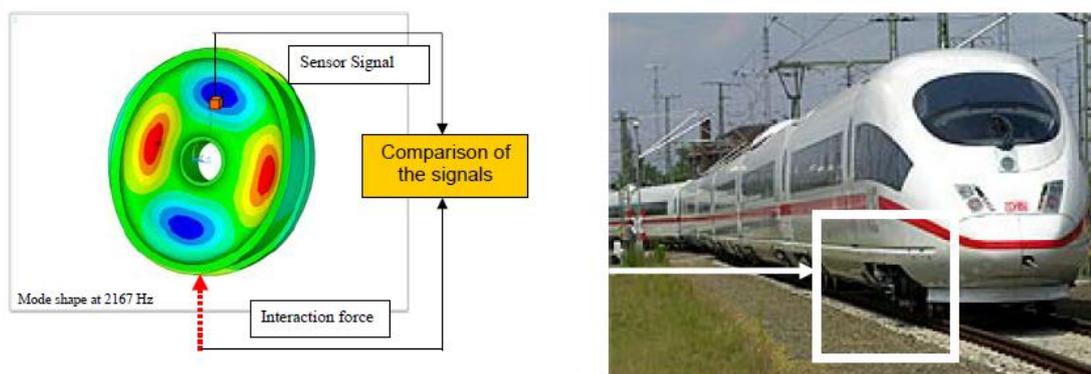


Рис. 7. Дефектоскопия вагонных колес [12]

Очень привлекательной выглядит идея частично излечивающей себя конструкции при малых повреждениях активацией растягивающейся арматуры (проводками), выпуском (выдавливанием) клея или другими путями, пока еще реализованная в единичных, в основном лабораторных, приложениях.

Самовосстанавливающиеся конструкции обладают лучшими эксплуатационными свойствами и более продолжительной работоспособностью по сравнению с обычными системами. Большая часть этих систем при появлении повреждения в ответ сразу же приступают к ремонту без внешней координации данного процесса.

Исторически сложилось так, что с появлением резин и растворителей начали появляться самоуплотняющиеся материалы. Один из наиболее ранних патентов (1896 г.) принадлежит Mercier, который разработал материал, залечивающий самостоятельно прокол стенки (рис. 8) [9].

Технологии самоуплотняющихся сосудов с жидкостью нашли свое развитие с появлением различных современных систем, в которых неконтролируемая утечка жидкости может быть чрезвычайно опасной и привести к невозможности эксплуатации или уничтожению самой системы. Это, например, скафандры, автомобили и самолеты.

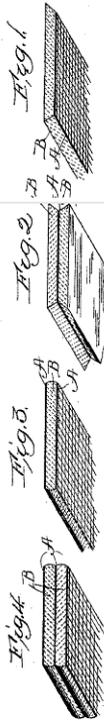
Хорошо спроектированная система может обрабатывать широкий диапазон рабочих условий, типичных повреждений и обладает способностью заблаговременного уведомления о критических повреждениях или при угрозе разрушения. Однако такого рода подход имеет целый ряд недостатков [5]:

- применяющаяся сенсорная система опирается на предсказуемость результатов, что является само по себе ограничивающим фактором во всем, кроме космической техники;

- реализованный подход самовосстановления с помощью термопластичных материалов ограничен в практическом применении, так как при работе по восстановлению целостности материала временно ослабляется конструкция, кроме этого, требуется такая геометрия элементов конструкций, чтобы материал мог легко поступить

(No Model.)

P. MERCIER.  
MATERIAL FOR PROTECTING VESSELS, RECEPTACLES, &c.  
No. 561,905. Patented June 9, 1896.



Witnesses } G. A. de Kater  
                  } v. L. Naze

Inventor:  
Pierre Mercier

# UNITED STATES PATENT OFFICE.

PIERRE MERCIER, OF LONDON, ENGLAND.

MATERIAL FOR PROTECTING VESSELS, RECEPTACLES, &c.

SPECIFICATION forming part of Letters Patent No. 561,905, dated June 9, 1896.  
Application filed September 4, 1894. Serial No. 523,114. (No specification.) Patented in France August 11, 1894, No. 240,688, and in England August 22, 1894, No. 14,001.

To all whom it may concern:  
Be it known that I, PIERRE MERCIER, a citizen of the Republic of France, and a resident of 76 Chancery Lane, London, England, have invented a certain new and useful Improvement in Materials for Protecting Vessels, Receptacles, Articles of Clothing, of Furniture, and the Like, (for which I have obtained patents in France, No. 240,688, dated August 11, 1894, and in Great Britain, No. 16,001, dated August 22, 1894,) of which the following is a specification.  
My invention relates to a new or improved material for protecting vessels, receptacles, articles of clothing, of furniture, and the like, which is applied in the form of a sheet or layer or sheets or layers of suitable shape and thickness and may be made of impermeable material, such as india-rubber. The characteristic feature of this material is to expand into its normal position after it has been punctured, so as to close the opening as soon as the puncturing tool or implement is withdrawn from the opening, and provided this tool has not removed too considerable a portion of the said material.  
My invention is based upon the fact that some absorbents, such as india-rubber or gelatin, swell when imbibing absorbable substances, such as vaseline for india-rubber and water for gelatin; and its object is to produce a new material capable of general application and of rendering vessels, receptacles, and objects of every kind impermeable when applied upon their surface.  
In carrying my invention into practice I use linen, canvas, or other suitable fabric made, preferably, with strong and but slightly-extensible threads of hemp, flax, cotton, silk, or other suitable material capable of being woven at least in one direction with threads of different material either not extensible, such as wires, or more or less elastic, such as wool or even ordinary vulcanized india-rubber. I use by preference a fabric having relatively loose meshes, so that they may be readily penetrated by the absorbent used and may firmly retain the latter. The absorbent I prefer is slightly-vulcanized india-rubber, of which I spread a suitable layer upon the

fabric, and I cause it to penetrate well in its meshes.  
Figures 1, 2, 3, and 4 in the accompanying drawings are sectional perspective views of portions of sheets or strips of material made in accordance with my invention.  
The letter A indicates the confining-webbing, and B the absorbent material incorporated with the webbing, so as to have its molecules put under compression when impregnated with the oil or substance in liquid form.  
I may, as shown in the accompanying drawings, apply this material on one side only of the linen, Fig. 1, or on both sides, Fig. 2, or place it between two or three layers of linen, Figs. 3 and 4.  
In any instance the absorbent material and confining-webbing are incorporated in such manner that the absorbent material when properly impregnated with liquid has its molecules held by the webbing in a state of compression, so as to instantly expand into and fill any opening which may be formed therethrough.  
I subsequently subject the india-rubber to 75 a boiling process in the ordinary way or to any other treatment in order to obtain, by preference, a moderate vulcanization, as india-rubber which is not much vulcanized is more absorbent and remains more flexible 80 and more plastic after its final treatment according to my invention. The treatment to which I subsequently subject the sheets of india-rubber thus wrapped or incased in linen consists in exposing the latter to the action 85 of liquid or solid vaseline, paraffin, wax, or grease to that of any other suitable mixture of these substances alone or mixed with suitable organic oils or fats. I use heat when needed to facilitate the operation, and I allow the substances to act on the india-rubber until the latter has absorbed a sufficient quantity thereof and is sufficiently softened, distended, and swollen. Being held by the non-extensible linen, the india-rubber is compressed in all 95 directions in such a manner that if the sheets thus prepared are punctured the material returns forthwith to its original place, and thus closes the opening formed. For the same reason, when the above-mentioned sheets are cut 100

Рис. 8. Патент США 1896 г. на изобретение самозалечивающегося материала [9]

в поврежденные участки;

– недостаточное развитие алгоритмов обнаружения поврежденности: ранее существовавшее повреждение может поставить под угрозу базовые значения для системы мониторинга, снижает эффективность работы алгоритмов обнаружения повреждений;

– зависимость от времени алгоритмов обнаружения поврежденности; медленно растущие повреждения, такие как усталость, в настоящее время пока остаются незамеченными, так как применяемые методы основываются на довольно быстром отклонении отслеживаемой кривой состояния конструкции из-за повреждения (это аналогично различию между острыми и хроническими заболеваниями или болью в биологических системах).

Еще одним нерешенным вопросом является масштабируемость. В больших масштабах количество информации, поступающей от сети сенсоров, может стать настолько громоздким, что потребуются специальное управление самовосстановлением конструкции. Биологическим системам удалось справиться с этой проблемой путем добавления уровней иерархии системы через промежуточные узлы фильтрации и делегированием различных функций, каждая из которых может быть применена к инженерным системам.

Применение smart-материалов все расширяется, и в настоящее время их можно встретить даже в бытовых приложениях. Для нового поколения лыжных трамплинов, теннисных ракеток, сноубордов, клюшек для гольфа и бейсбольных бит (рис. 9) становится важным демпфирование возникающих колебаний, так как это не только увеличивает комфорт при их использовании, позволяет достигать лучших результатов, но и предотвращает от поломок.

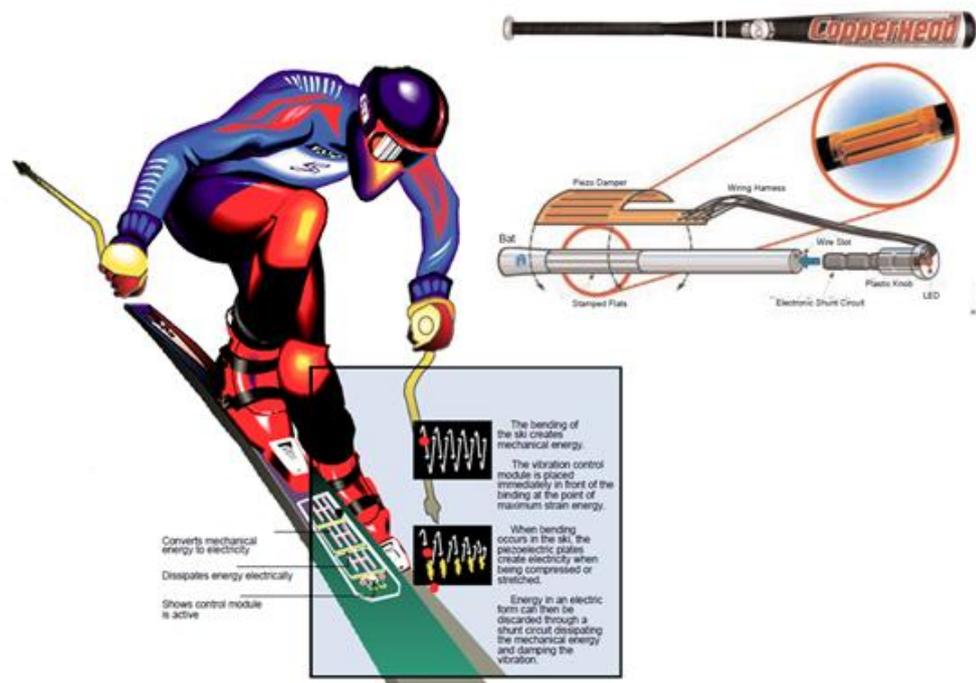


Рис. 9. Применение smart-концепции в спортивном инвентаре [1, 13]

Фирма «Head Intelligence» первой в мире выпустила теннисные ракетки из пьезоволокон [13]. Если до сих пор все попытки увеличить мощность ракеток ограничивались чистой механикой и «фокусами» с новыми материалами, то здесь ради той же цели разработчики впервые использовали электричество. Весь секрет таких ракеток заключен в пьезоэлектрических волокнах (head intelligifibres), способных преобразовывать механическую энергию мяча в электрический импульс (волокна вырабатывают электричество при любом их малейшем изгибе или деформации). За счет этой «искры», проскакивающей по ободу за менее чем тысячную долю секунды, ракетка в момент удара приобретает дополнительную жесткость – отсюда и новый резерв мощности и к тому же – полное отсутствие вибрации. Эти технологии уже опробованы в горных лыжах и сноубордах.

Развитие smart-конструкций и smart-материалов, несомненно, становится одной из важнейших задач во многих областях науки и технологий, таких как микроэлектроника, информатика, медицина, науки о жизни, энергетика, транспорт, техника безопасности и военные технологии.

По своей сути технология smart-материалов и конструкций является весьма междисциплинарной областью, охватывающей фундаментальные науки – физику, химию, механику, компьютерную технику и электронику, и прикладные отрасли науки и техники, такие как авиация и машиностроение. Именно этим можно объяснить довольно медленный и осторожный прогресс в применении интеллектуальных конструкций на практике, несмотря на то, что научные разработки в этой области продвигаются очень быстро [6].

Область исследований smart-материалов и конструкций привлекает пристальное внимание не только научной зарубежной общественности, но и правительственных структур самого высокого уровня, а также передовых коммерческих корпораций. В США перспективность этих исследований изучала комплексная комиссия, в которую входили представители Комитета по новым материалам для гражданских самолетов следующего поколения (Committee on New Materials for Advanced Civil Aircraft), Комиссии по конструкциям и техническим системам (Commission on Engineering and Technical Systems), Национального исследовательского Совета (National Research Council) [11].

---

На исследования по этой теме выделяются существенные финансовые средства. По сведениям, приведенным в [13], в 1992–1996 годах различные правительственные учреждения США выделяли около \$ 40 млн ежегодно на исследования в области smart-материалов, и по \$ 12 млн в год – коммерческие предприятия. Только ARPA (Advanced Research Projects Agency – Агентство передовых исследований, США) вложило за этот период \$ 40 млн в развитие технологий, выделив дополнительно \$ 30 млн на демонстрацию в рамках данного проекта возможностей практического применения интеллектуальных материалов. В Великобритании исследования smart-материалов и конструкций финансируются также не из одного источника. Основные средства на исследования и разработки поступают из Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) (Совет по техническим и физическим наукам), который финансирует 6 программ в 28 университетах, выделяя по £ 21 млн. В финансировании этих программ также участвуют Министерство обороны Великобритании, British Aerospace и компания Du Pont [19]. Министерство обороны при этом отмечает, что «smart-материалы и активные конструкции» являются приоритетным направлением развития технологий. Активные исследования в этой области проводятся также в Японии [7] и в Китае [2]. В России отдельные группы ученых в Санкт-Петербурге, Москве, Ростове-на-Дону, Краснодаре занимаются различными аспектами как разработки smart-материалов и конструкций, так и их приложений в различных высокотехнологичных отраслях экономики. В том числе и в Перми, в Институте механики сплошных сред УрО РАН проводятся исследования, посвященные оптимизации динамического поведения smart-конструкций, а именно, их диссипативных свойств [26-31]. В качестве объектов исследований приняты конструкции, в состав которых входят элементы, выполненные из пьезоматериалов, соединенные с внешними электрическими цепями. Целью работ является создание эффективных методов математического моделирования, позволяющих находить:

- наилучшее размещение пьезоэлемента на конструкции, обеспечивающее при его деформировании генерацию наибольшего по величине сигнала, то есть, эффективную работу пьезоэлемента,

- параметры элементов и тип внешней электрической цепи (последовательная, параллельная, либо их комбинация), обеспечивающие на заданных резонансных частотах максимальные демпфирующие свойства электроупругого тела с внешними электрическими цепями.

За немногими исключениями, рынок smart-материалов и их технологий относительно молод и остается плохо изученным. Большинство современных применений весьма просты или являются производными друг от друга. Но эти материалы найдут более сложное применение, новые реализации и приобретут массовость тогда, когда технологии будут достаточно разработаны, а для поставщиков и пользователей эти материалы станут обычными.

Smart-конструкции будут развиваться, постепенно стирая различия между искусственными технологиями и природой, между живым и неживым. Самообучаемое оборудование и программное обеспечение будут производить необходимые и желаемые (но уже кем?) собственные аппаратные средства и программное обеспечение.

## Библиографический список

1. Akhras G. Smart materials and smart systems for the future // Canadian Military Journal. – 2000. – № 3. – P. 25–32.
2. Asundi A.K. Smart structures research at NTU (College of Engineering Nanyang Technological University, Singapore) – 9 p.  
<http://www3.ntu.edu.sg/mae/Research/programmes/Sensors/sensors/fos/smart-in.pdf>

3. Concise encyclopedia of composite materials / ed. A. Kelly. – England, 1994. – 350 p.
4. *Grohmann B., Maucher C., Jänker P.* Actuation concepts for morphing helicopter rotor blades // 25<sup>th</sup> International Congress of the Aeronautical sciences. – Canada, 2006. – 10 p.
5. *Hurley D.A., Huston D.R.* Coordinated sensing and active repair for self-healing // Smart Mater. Struct. – 2011. – Vol. 20. – № 2. – 7 p. DOI:10.1088/0964-1726/20/2/025010.
6. *Lee H.-J., Saravanos D.* Layerwise finite elements for smart piezoceramic composite plates in thermal environments // NASA TM-106990 AIAA-96-1277, 1996. – 48 p.
7. *Matsuzaki Y.* Smart structures research in Japan. (Review article) // Smart Mater. Struct. – 1997. – № 6. – P. R1–R10.
8. *Mehrabian A.R., Yousefi-Koma A.* A novel technique for optimal placement of piezoelectric actuators on smart structures // Journal of the Franklin Institute. – 2011. – Vol. 348. – P. 12–23.
9. *Mercier P.* Material for protecting vessels, receptacles, &c. / US Patent Specification. – 1896. – 561905. – 3 p.
10. *Nader M., Irschik H., v. Garßen H.-G.* Aktive Schwingungskompensation im Leichtbau mit piezoelektrischen Materialien // Internationales Forum Mechatronik. – Linz, 2006.
11. New Materials for Next-Generation Commercial Transports / Report Committee on New Materials for Advanced Civil Aircraft, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council 1996, 98 p.
12. *Nuffer J., Bein T.* Application of piezoelectric materials in transportation industry // Global Symposium on Innovative Solutions for the Advancement of the Transport Industry. – 2006. – 4–6 October, San Sebastian, Spain. – 11 p.
13. *Ouellette J.* How Smart are Smart Materials? // The Industrial Physicist. – 1996. – P. 10–13.
14. *Petroski H.* To Engineer is Human: The Role of Failure in Successful Design. – New York: St. Martin's Press, 1985. – 247 p.
15. Qualitative health monitoring of a steel bridge joint via piezoelectric actuator/sensor patches / *J.W. Ayres, F. Lalonde, C.A. Rogers, Z. Chaudhry* // SPIE Nondestructive Evaluation Techniques for Aging Infrastructure & Manufacturing – 1996. – 3–5 December, Scottsdale. – 8 p.
16. Quantitative health monitoring of bolted joints using a piezoceramic actuator–sensor / *S. Ritdumrongkul, M. Abe, Y. Fujino, T. Miyashita* // Smart Mater. Struct. – 2004. – № 13. – P. 20–29.
17. Recent advances in Eurocopter's passive and active vibration control / *P. Konstanzer, B. Enenkl, P.-A. Aubourg, P. Cranga* // 64<sup>th</sup> Annual Forum of the American Helicopter Society. – Canada, Montreal. – April 29–May 1, 2008.
18. *Schulz M.J., Pai P.F., Inman D.J.* Health monitoring and active control of composite structures using piezoceramic patches // Composites: Part B. – 1999. – Vol. 30. – P. 713–725.
19. Smart Materials and Systems // Postnote. Parliamentary Office of Science and Technologe. 2008, № 299. – P.1–4.  
[www.parliament.uk/parliamentary\\_offices/post/pubs2008.cfm](http://www.parliament.uk/parliamentary_offices/post/pubs2008.cfm).
20. Smart materials for the 21<sup>st</sup> Century. Foresight Smart Materials Taskforce. Report Smart Materials & Systems Committee no. FMP/03/04/IOM3 56 p.  
<http://www.iom3.org/foresight>.
21. *Sodano H.A.* Macro-Fiber Composites for Sensing, Actuation and Power Generation // PhD Thesis. – Blacksburg, Virginia, 2003. – 151 p.
22. *Spillman W.B., Jr., Sirkis J.S., Gardiner P.T.* Smart materials and structures: what are they? // Smart Mater. Struct. – 1996. – № 5. – P. 247–254.
23. Wavelet-based active sensing for delamination detection in composite structures / *H. Sohn, G. Park, J.R. Wait, N.P. Limback, C.R. Farrar* // Smart Mater. Struct. – 2004. – № 13. – P. 153–160.

- 
24. *Wadhawan V.K.* Smart Structures and Materials // Resonance. – 2005. – № 11. – P. 27–41.
  25. *Wang Z.L., Kang Z.C.* Functional and Smart Materials - Structural Evolution and Structure Analysis. – New York: Plenum Publish Corporation, 1998. – P. 93–149.
  26. *Иванов А.С., Матвеевко В.П., Ошмарин Д.А., Севодина Н.В., Юрлов М.А., Юрлова Н.А.* Обоснование использования эквивалентных схем замещения для оптимизации диссипативных свойств электроупругих тел с внешними электрическими цепями // Известия РАН. МТТ, 2016. – № 3. – С. 40-54.
  27. *Матвеевко В.П., Клизман Е.П., Юрлов М.А., Юрлова Н.А.* Моделирование и оптимизация динамических характеристик smart-структур с пьезоматериалами // Физическая мезомеханика, 2012. – Т. 15, № 1. – С. 75-85. Перевод: «Simulation and optimization of dynamic characteristics of piezoelectric smart structures» // Physical Mesomechanics, 2012. - V. 15, No. 3–4. – P. 190–199.
  28. *Matveenko V.P., Sevodina N.V., Yurlova N.A., Oshmarin D.A., Yurlov M.A., Ivanov A.S.* Determination of parameters of the external electric circuits providing maximum damping of vibrations of electroelastic bodies / Dynamics and Control of Advanced Structures and Machines (eds. H. Irschik, A. Belyaev, M. Krommer), Springer, 2016. – P. 93–100.
  29. *Matveenko V.P., Yurlov M.A., Yurlova N.A.* Optimization of the damping properties electro-viscoelastic objects with external electric circuits // Mechanics of Advanced Materials/ eds. V.V. Silberschmidt and V.P. Matveenko. – Engineering Materials, Springer. – 2015. – P. 79–100.
  30. *Матвеевко В.П., Ошмарин Д.А., Севодина Н.А., Юрлова Н.А.* Задача о собственных колебаниях электровязкоупругих тел с внешними электрическими цепями и конечно-элементные соотношения для ее численной реализации // Вычислительная механика сплошных сред, 2016. – Т. 9, № 4. – С. 476–485.
  31. *Sevodina N.V., Yurlova N.A., Oshmarin D.A.* The optimal placement of the piezoelectric element in a structure based on the solution of the problem of natural vibrations // Solid State Phenomena. – 2015. – Vol. 243. – P. 67–74.