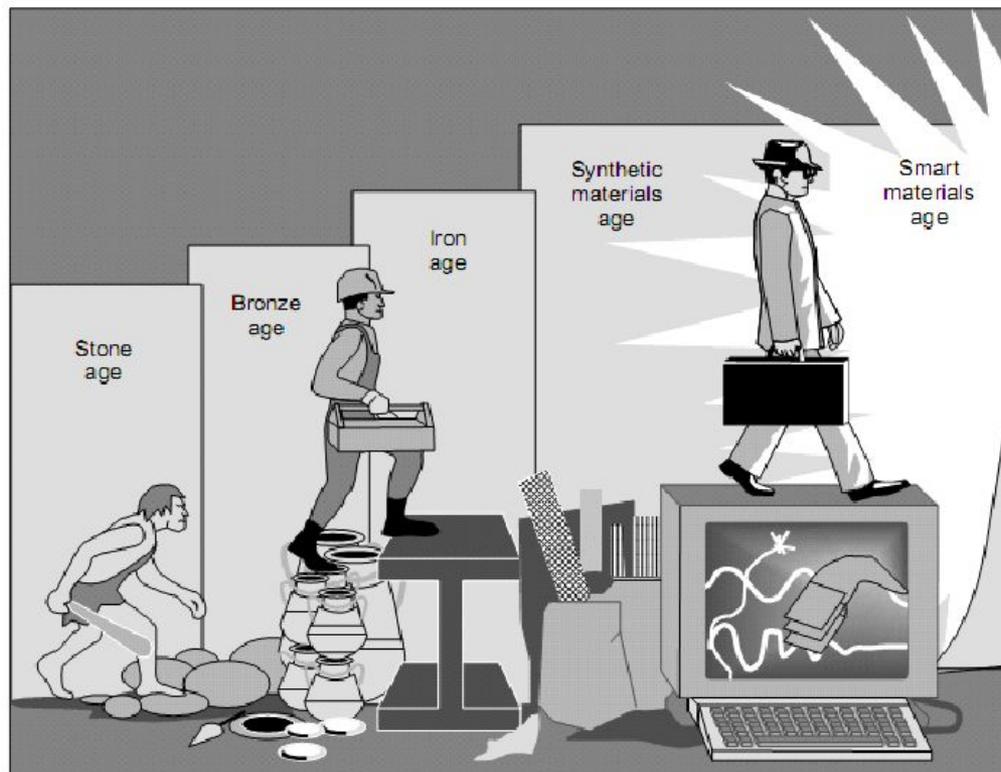




Возможности и перспективы создания армированных ПКМ и элементов конструкций из них с элементами интеллектуальности

П.Г. Бабаевский

Хронология материального развития человечества



Введение

В настоящее время происходит зарождение и развитие материалов нового поколения – интеллектуальных или «умных», к которым относятся материалы, реагирующие определенным образом на изменения условий или состава окружающей среды (температуры, давления, концентрации компонентов и адсорбируемых молекул, pH среды) и/или воздействия механического, гравитационного, электрического и магнитного силовых полей, вибраций или колебаний и излучений, изменяя свои свойства и геометрию и адаптируясь к изменениям условий эксплуатации, обеспечивать самоконтроль за возникновением и развитием усталостных повреждений, их идентификацию и локализацию, корректировать напряженное состояние конструктивного элемента с целью ликвидации критической ситуации.

Интеллектуальные материалы и конструкции представляют собой интегрированные структуры, включающие сенсорные, активирующие, контролирующие и управляющие подсистемы с заданным типом обратной связи (замкнутым контуром управления).

Базовые элементы интеллектуальных материалов и конструкций с обратной СВЯЗЬЮ

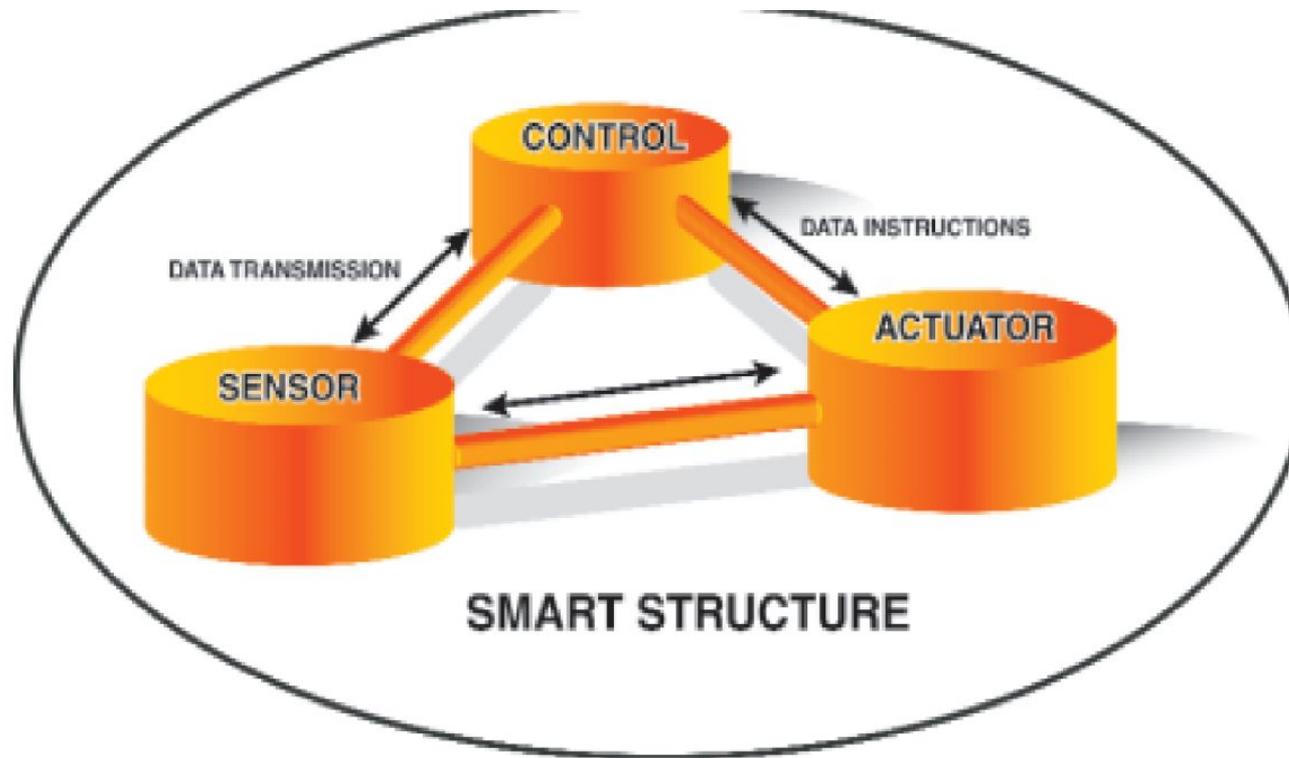


Figure 2 : The Basic Five Components of a Smart Structure

**встроенный сенсор (датчик) – передача данных - система
контроля - передача команды - актюаторный
(исполнительный) механизм а**

Важнейшие классы и типы материалов с элементами интеллектуальности:

По реакции на стимулирование:

- термо- и механоактивные
- электро- и магнитоактивные.

По проявляемому эффекту:

- с эффектом памяти формы;
- механохромные;
- самозалечивающиеся

Термостимулируемый эффект памяти формы (ТС ЭПФ)

ТС ЭПФ - способность материала или элемента конструкции к изменению (конверсии), фиксированию (стабилизации) и восстановлению формы и размеров, т.е. способность претерпевать определенные деформации, сохранять их достаточно длительное время и самопроизвольно возвращать исходную форму и размеры, обеспечивая требуемую степень и усилие восстановления, в определенных температурных интервалах - конверсии (Тк), восстановления (Тв) и фиксации (Тф) измененной и восстановленной формы.

Решающее значение при использовании ТС ЭПФ имеют механизм, кинетика и величина обратимых деформаций, а также модуль упругости материала на стадиях конверсии и восстановлении, определяющего требуемое для изменения формы и развиваемое при восстановлении формы усилие.

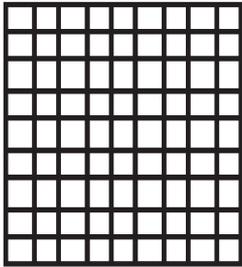
Материалы, обладающие ТС ЭПФ: металлические сплавы с эффектом сверхпластичности (нитинолы) и полимерные материалы (пористые, дисперсно-наполненные и армированные полимеры).

Возможное применение материалов с ТС ЭПФ в авиакосмической технике:
- активирование механических нагрузок и деформаций, направленное изменение формы и размеров конструкций (морфинг, создание трансформируемых конструкций), самозалечивание дефектов.

реализации ТС ЭПФ в металлических сплавах

Механизм ТС ЭПФ базируется на обратимом бездиффузионном (мартенситном)

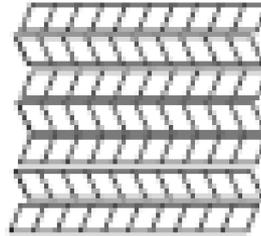
превращении жесткой аустенитной фазы в конверсионную ~~и сверхпластичную~~ мартенситную фазу. Кинетика - на практически мгновенном фазовом превращении



Аустенит
Деформированный
(Тисх)
мартенсит (Тк=Тф)

Охлаждение

(Тисх → Тк)

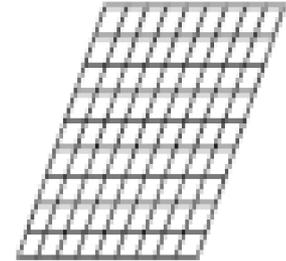


Мартенсит

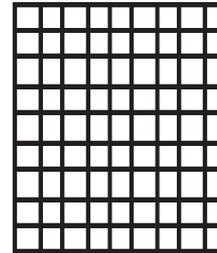
(Тк)

Пластическое

деформирование (Тк)



Восстановление и стабилизация исходной фазы



Нагревание
(Тф → Тв)

Аустенит
(Тв)

Механизм и кинетика проявления ТС ЭПФ в полимерах

(принципиально отличные от его проявления в металлических сплавах)

Механизм проявления ТС ЭПФ в полимерах основан на обратимости высокоэластических деформаций и их способности к фиксации и восстановлению вследствие замораживания или размораживания сегментального теплового движения (стеклования/расстекловывания как релаксационного перехода) или вследствие фазового превращения (кристаллизации/плавления, жидкокристаллического или аморфного фазового разделения) при охлаждении ниже или при нагревании выше температуры релаксационного или фазового перехода

Кинетика проявления ТС ЭПФ в полимерах определяется медленным характером релаксационного процесса установления равновесных высокоэластических деформаций и резко зависит от температуры

Преимущества и недостатки полимеров и ПКМ в сравнении с металлическими сплавами с ТС ЭПФ:

преимущества - большие обратимые деформации и малые усилия деформирования на стадии изменение формы;

недостатки - малые усилия при восстановлении в заневоленном состоянии из-за низкого модуля упругости и релаксационный (замедленный, вязко-упругий) характер высокоэластических деформаций

Схемы реализации ТС ЭПФ в полимерах существенно зависит от молекулярной и надмолекулярной структуры, фазового и реологического состояния полимера

Основные типы полимеров, проявляющих ТС ЭПФ

- Густосетчатые стеклообразные (отвержденные некристаллизующиеся) полимеры
- Кристаллизующиеся сетчатые (редкосшитые) полимеры
- Некристаллизующиеся, кристаллизующиеся или жидкокристаллические сегментированные блоксополимеры, состоящие из гибких и жестких блоков и способных образовывать микрогетерогенную фазовую структуру в результате фазового превращения

Во всех типах полимеров конверсионной фазой служит полимерная сетка, образованная химическими узлами (два первых типа полимеров) или микрофазами (физическими узлами) - в случае сегментированные сополимеров

Схема реализации ТС ЭПФ в густосетчатых стеклообразных (отвержденных) полимерах (матрицах ПКМ)

Изменение и стабилизация измененной формы:

Исходное стеклообразное состояние ($T \ll T_g$) → Нагрев ($T \rightarrow T_k \geq T_g$) →

→ Высоко-эластическое состояние (T_k) → Деформирование (T_k) →

→ Деформированное высоко-эластическое состояние (T_k) →

→ Охлаждение ($T_k \rightarrow T_f \ll T_g$) → Деформированное стеклообразное состояние ($T_f \ll T_g$)

Восстановление и стабилизация исходной формы:

→ Нагрев ($T_f \rightarrow T_v \geq T_g$) → Восстановленное высоко-эластическое состояние (T_v) →

→ Охлаждение ($T_v \rightarrow T_f \ll T_g$) → Восстановленное стеклообразное состояние ($T \ll T_g$)

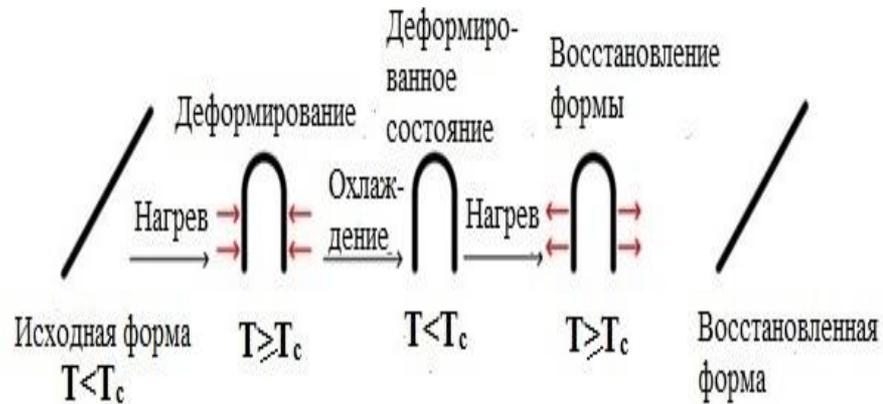


Схема реализации ТС ЭПФ в кристаллизующихся сетчатых (редкосшитых) полимерах

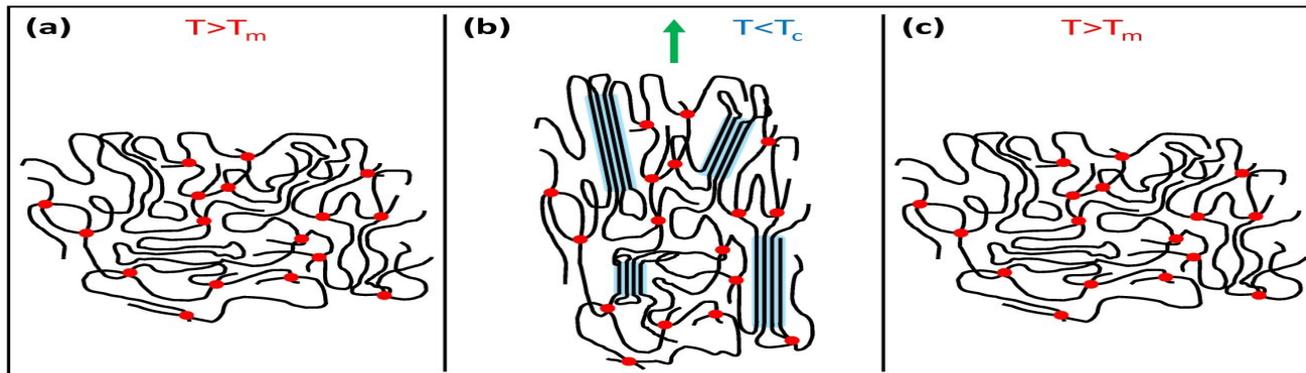
Одно-стадийный эффект (одно-ступенчатое восстановление формы) :

Изменение и стабилизация измененной формы:

Исходное аморфно-кристаллическое состояние ($T \ll T_m$) → Нагрев ($T \rightarrow T_k > T_m$) →
→ Высокоэластическое состояние (T_k) → Деформирование (T_k) → Деформированное
высокоэластическое состояние (T_k) → Охлаждение ($T_k \rightarrow T_f < T_m = T_{кр}$) →
Деформированное аморфно-кристаллическое состояние ($T_f \ll T_m$)

Восстановление и стабилизация исходной формы:

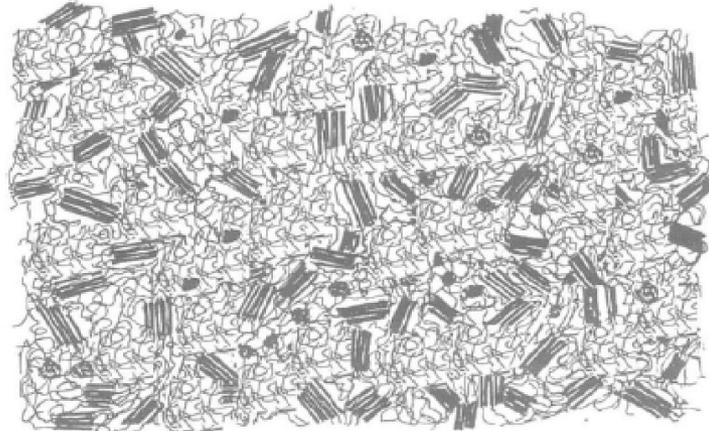
→ Нагрев ($T_f \rightarrow T_v > T_m$) → Восстановленное высокоэластическое состояние (T_v) →
→ Охлаждение ($T_v \rightarrow T_f < T_m = T_{кр}$) → Восстановленное аморфно-кристаллическое
состояние ($T \ll T_m$):



Двух-стадийный эффект (двух-ступенчатое восстановление формы): при дополнительной кристаллизации вследствие ориентационной вытяжки

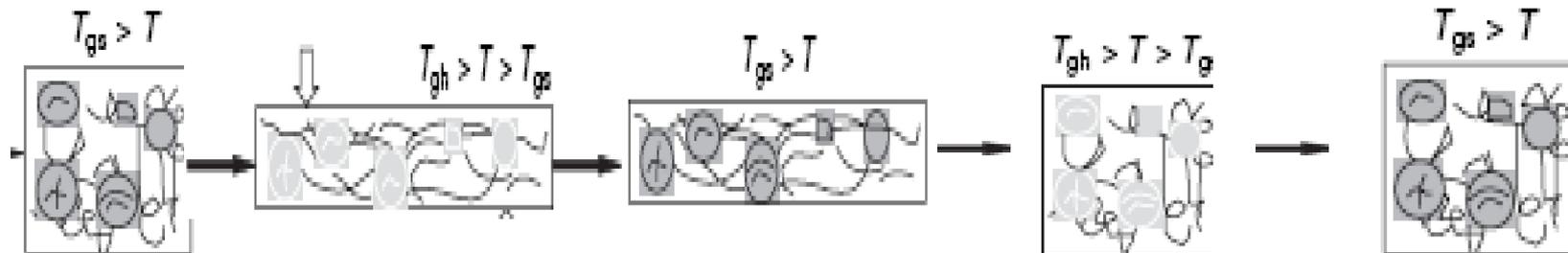
Возможные варианты фазового состояния, надмолекулярной структуры, фазовых и релаксационных температурных переходов в некристаллизующихся (аморфных), кристаллизующихся и ЖК сегментированных блоксополимерах

- **Аморфные, кристаллические или ЖК микрофазы, образуемые жесткими блоками и создающие физические узлы непрерывной сетки гибкоцепных блоков (конверсионной фазы), с повышенными температурами T_{gv} и T_{mv}**
- **Стеклообразная, кристаллическая или ЖК конверсионная макрофаза с пониженными температурами $T_{сн}$ и $T_{плн}$, образуемая ги**



Важное преимущество – повышенный модуль упругости на стадии восстановления деформации и высокая прочность в условиях эксплуатации за счет жестких микрофаз.

Схема реализации ТС ЭПФ в сегментированных некристаллизующихся блоксополимерах ($T_{gn}=T_{gs}$; $T_{gv}=T_{gh}$)



Изменение и стабилизация измененной формы:

Исходное стеклообразное состояние обеих фаз ($T < T_{gs}$) → **Нагревание** ($T_{gh} > T_k > T_{gs}$)

→ **Высокоэластическое состояние конверсионной фазы (T_k)**

→ **Деформирование (T_k)**

→ **Деформированное высокоэластическое состояние (T_k)**

→ **Охлаждение ($T < T_{gs}$)** → **Деформированное стеклообразное состояние ($T_f \ll T_{gs}$)**

Восстановление и стабилизация исходной формы:

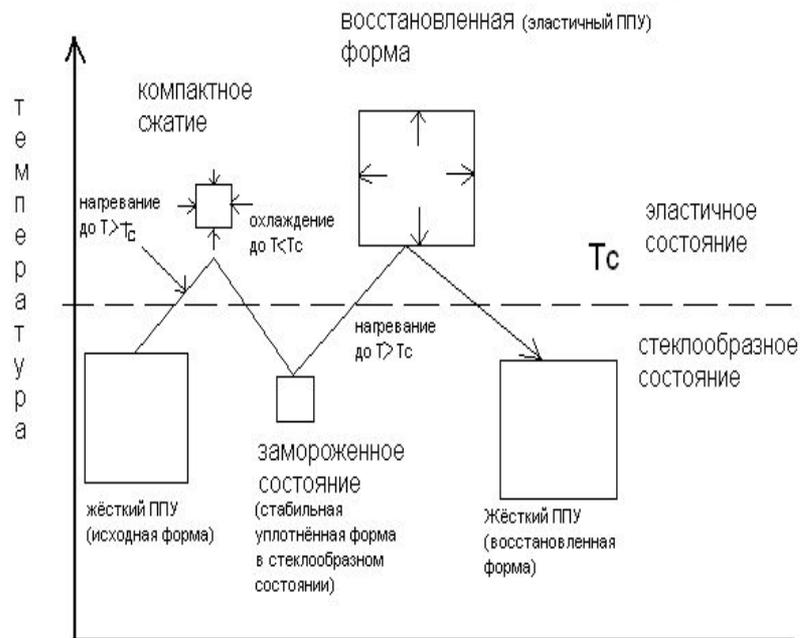
→ **Нагрев ($T_{gh} > T_f > T_{gs}$)** → **Восстановленное высокоэластическое состояние (T_f)**

→ **Охлаждение ($T_f \ll T_{gs}$)** → **Восстановленное стеклообразное состояние ($T_f \ll T_{gs}$)**

Жесткие поропласты на основе сегментированного полиэфируретана

(для повышения модуля упругости усилия, определяющего развиваемое при восстановлении формы, используется наполнение поропласта жесткими дисперсными частицами)

Последовательность стадий деформирования (уплотнения), самопроизвольного восстановления и фиксирования формы поропласта ППУ (а) и сэндвичевая структура в сжатом и восстановленном состоянии (б):



(а)



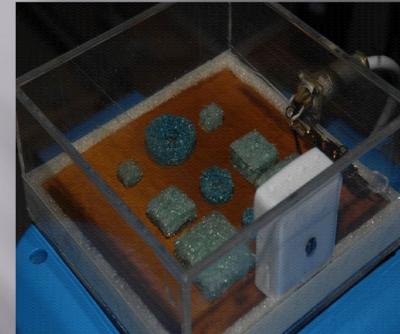
(б)

Проявление ТС ЭПФ в поропласте из блоксетчатого сополимера сегментированного полиэфируретана и амино-эпоксидного полимера в условиях микрогравитации

Научно-образовательный эксперимент на РС МКС



ПЕНАЛ: 1-С ЛЕТНЫМИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИМИ ОБРАЗЦАМИ: ПОСЛЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ НА БОРТУ РС МКС.



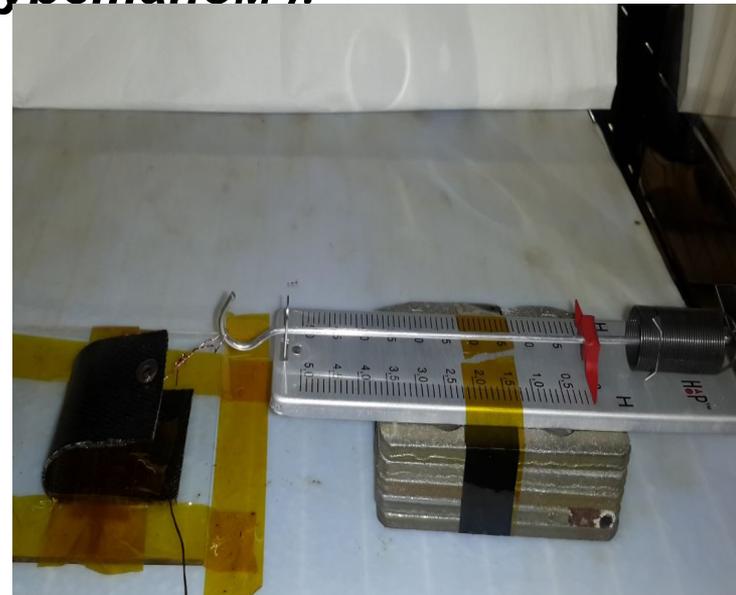
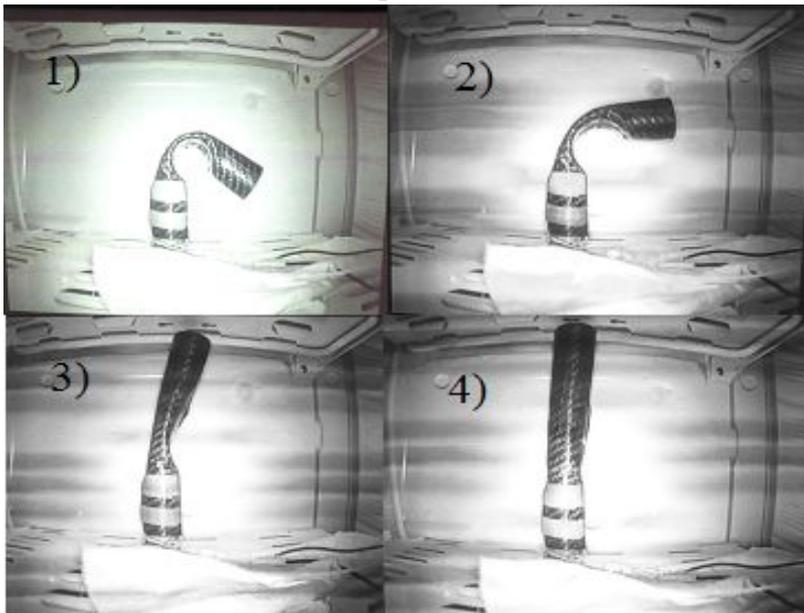
ПЕНАЛ: 1-С ЛЕТНЫМИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИМИ ОБРАЗЦАМИ: ДО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ НА БОРТУ РС МКС.

Армированные ПКМ

со встроенными резистивными нагревателями
(основную роль в проявлении ТС ЭПФ на стадии
восстановления формы играет армирующая система и степень
армирования, а полимерная матрица определяет стадии
конверсии и фиксирования формы)

Стадии восстановления формы трубчатого актюаторного
шарнира (а) и измерения развиваемого усилия при
восстановлении формы плоского шарнира (б).

*(Шарниры из ПКМ на основе углеродной ткани и амино-
эпоксидной матрицы, модифицированной
сегментированным полиэфируретаном):*

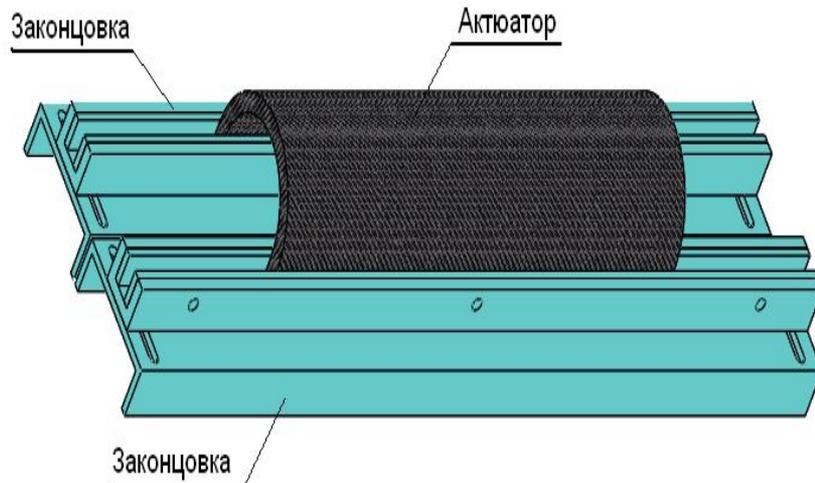


**Проявление ТС ЭПФ в ПКМ на основе углеродной
ткани и блоксетчатого сополимера
сегментированного полиэфируретана и амино-
эпоксидного полимера в условиях микрогравитации
Научно-образовательный эксперимент на РС МКС**

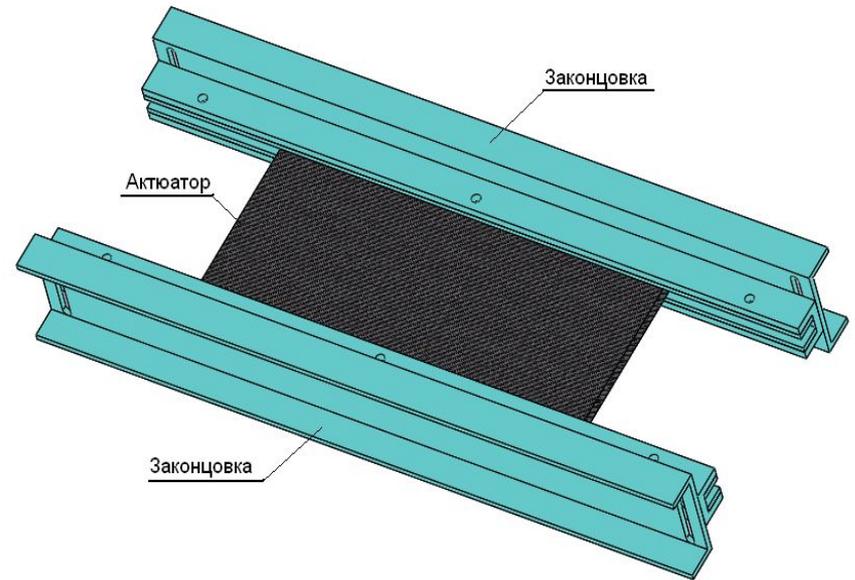


Модель шарнира из ПКМ в предварительно деформированном и развернутом состоянии

(А)



(Б)



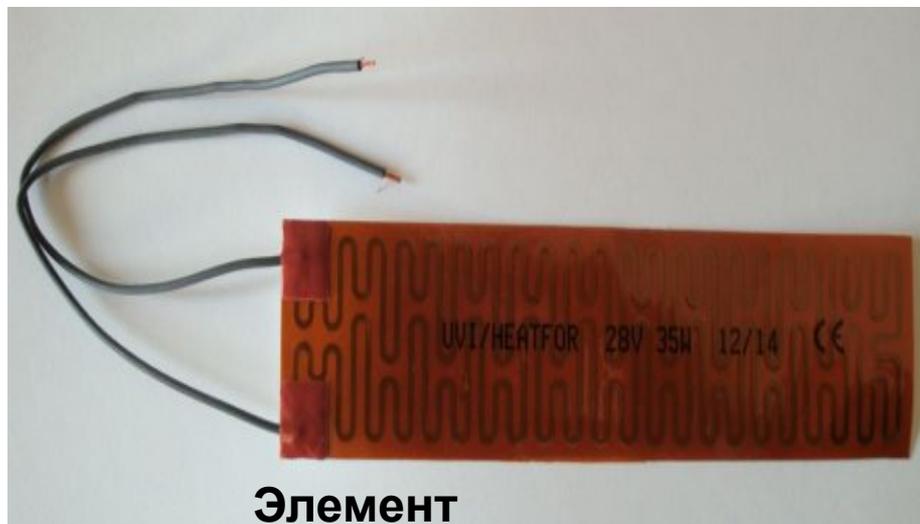
Составляющие элементы конструкции шарнира



Полуцилиндрические элементы



Упругий тонкостенный элемент из ПКМ с ЭПФ



Элемент
нагревательный

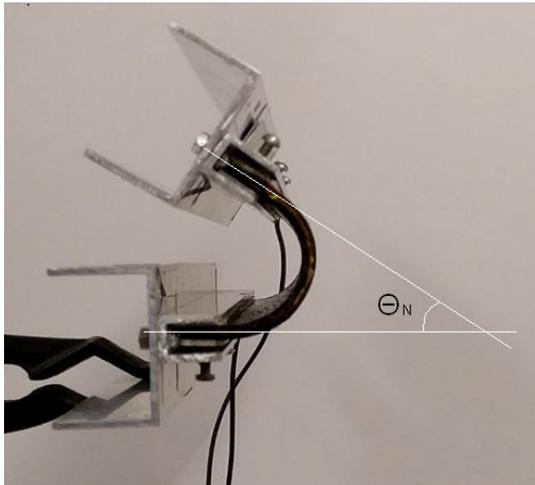
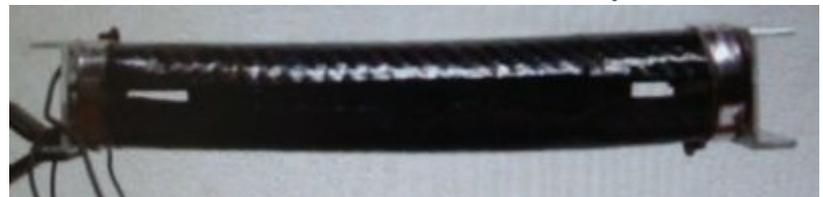
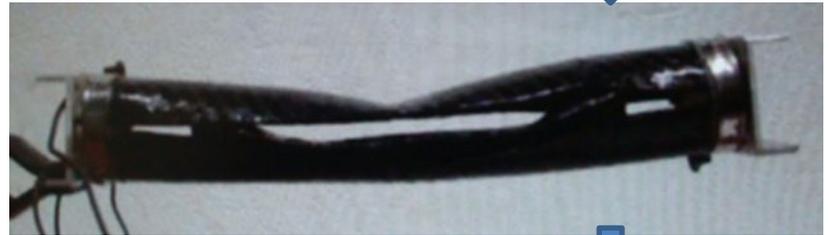


Полуцилиндрический элемент
с встроенным нагревателем

Определение угла разворачивания шарнира, времени, степени и усилия восстановления формы

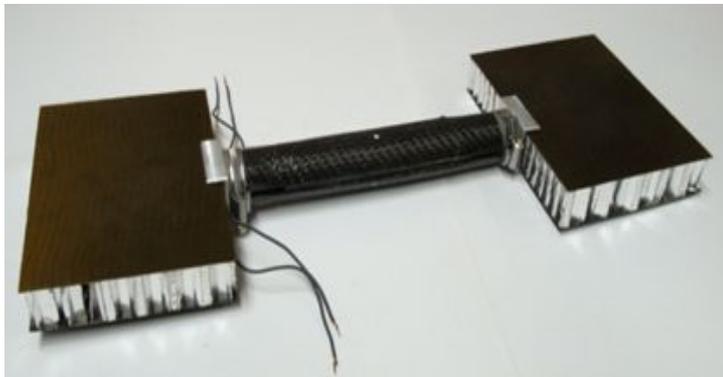
Шарнир в сложенном состоянии

восстановления формы шарнира после подачи напряжения





А)

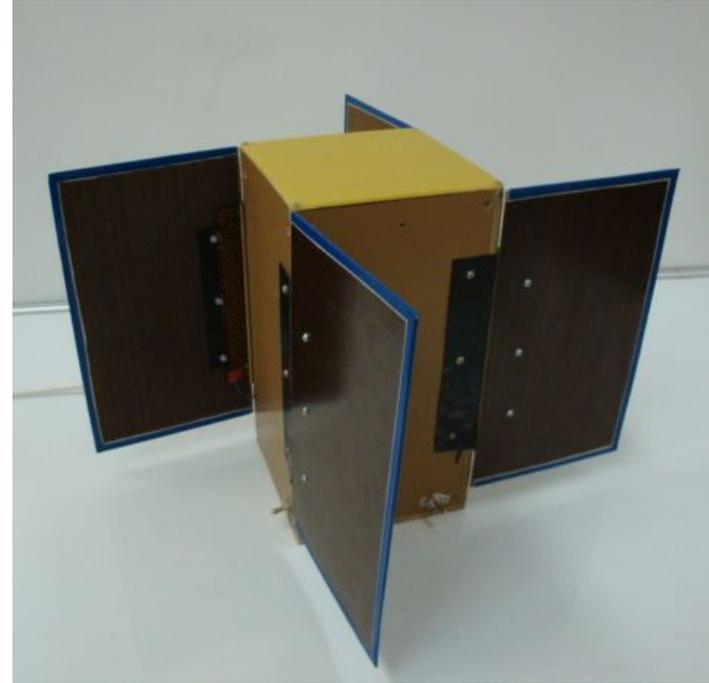


Б

**Трансформируемая
конструкция в сложенном (А) и
развернутом (Б) состоянии**



4,5 мин.



Модель трансформируемой
конструкции с плоскими
шарнирами из ПКМ с ЭПФ

Схема двухтадийного цикла складывания/разворачивания с помощью плоских шарниров из ПКМ с ЭПФ

