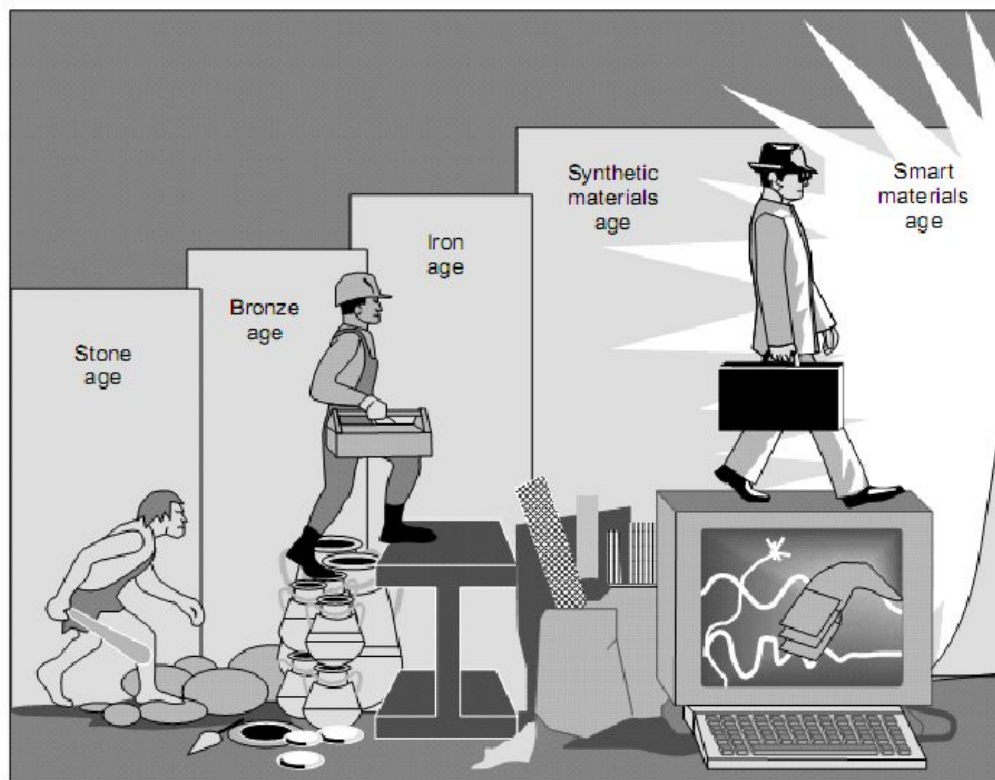




# **Возможности и перспективы создания армированных ПКМ и элементов конструкций из них с элементами интеллектуальности**

**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

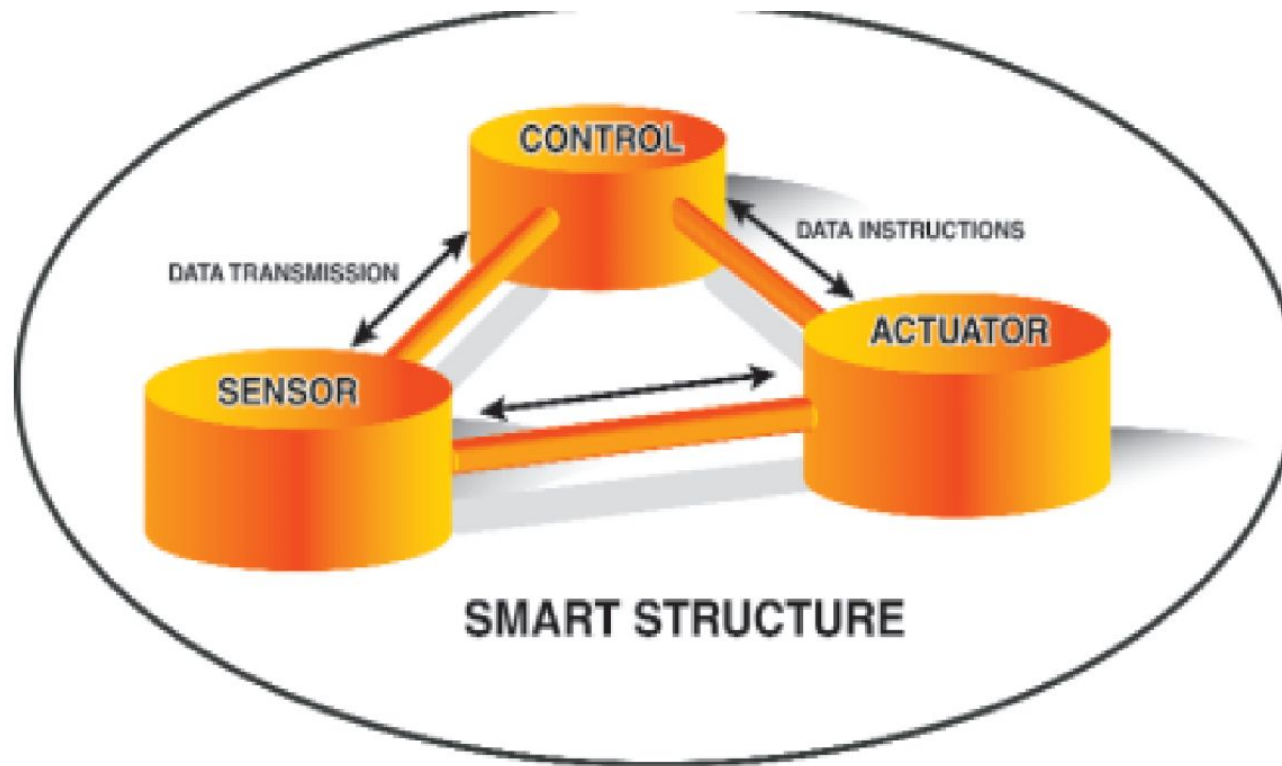


Figure 2 : The Basic Five Components of a Smart Structure

**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.**

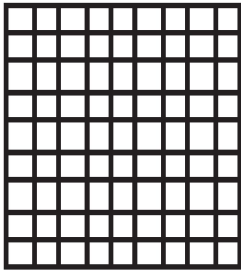
**Материалы, обладающие ТС ЭПФ: металлические сплавы с эффектом сверхпластичности (нитинолы) и полимерные материалы (пористые, дисперсно-наполненные и армированные полимеры).**

**Возможное применение материалов с ТС ЭПФ в авиакосмической технике:**  
**- актюирование 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)

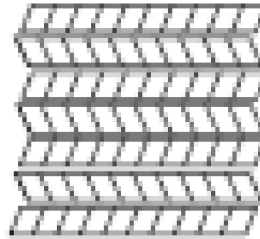
превращении жесткой аустенитной фазы в конверсионную ~~сверхпластичную мартенситную фазу~~ сверхпластичную мартенситную фазу. кинетика - на практически мгновенном фазовом превращении



Аустенит  
Деформированный  
(Тисх)  
мартенсит (Тк=Тф)

Охлаждение

(Тисх → Тк)

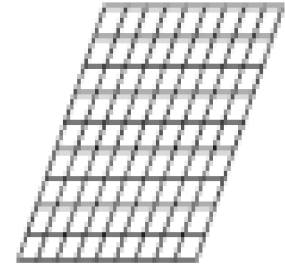


Мартенсит

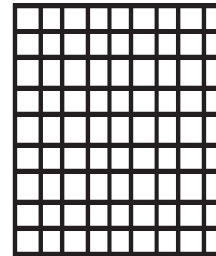
(Тк)

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 ( $T_k$ ) →

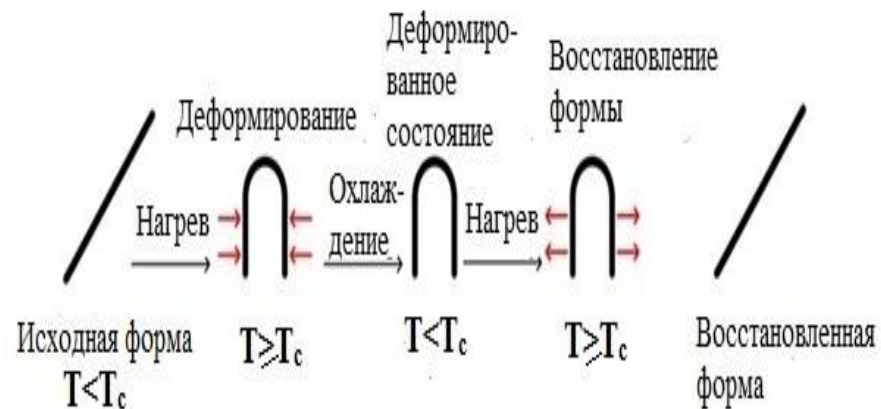
→ Деформированное высоко-эластическое состояние ( $T_k$ ) →

→ 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

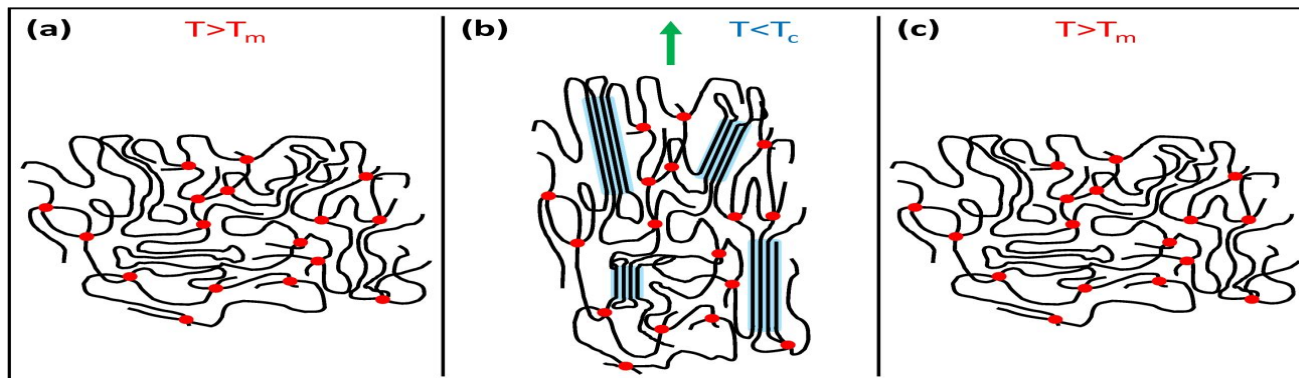
Одно-стадийный эффект (одно-ступенчатое восстановление формы) :

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:

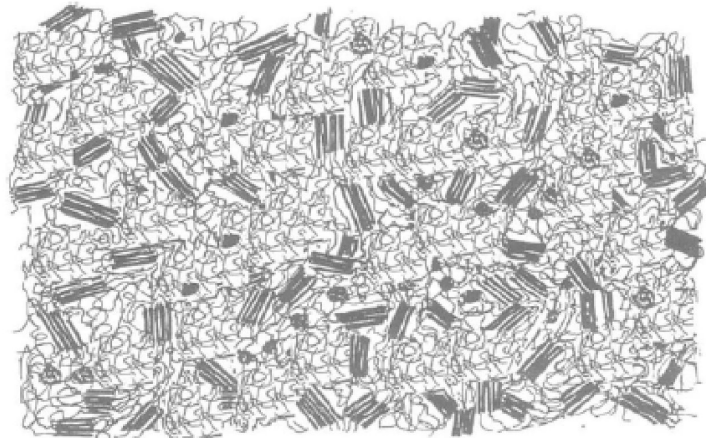
→ Нагрев ( $T_f \rightarrow T_v > T_m$ ) → Восстановленное высокоэластическое состояние ( $T_v$ ) →  
→ Охлаждение ( $T_v \rightarrow T_f < T_m = T_{кр}$ ) → Восстановленное аморфно-кристаллическое состояние ( $T \ll T_m$ ):



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

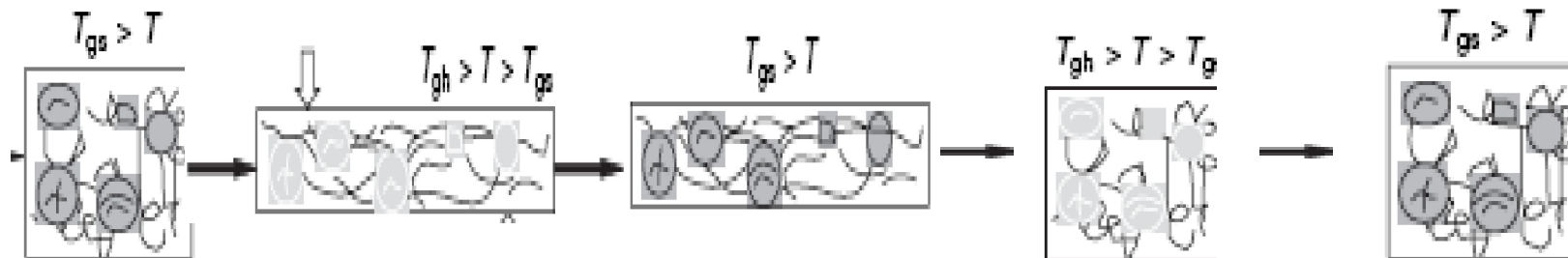
***Возможные варианты фазового состояния, надмолекулярной структуры, фазовых и релаксационных температурных переходов в некристаллизующихся (аморфных), кристаллизующихся и ЖК сегментированных блоксополимерах***

- 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 г<sub>v</sub>



**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:

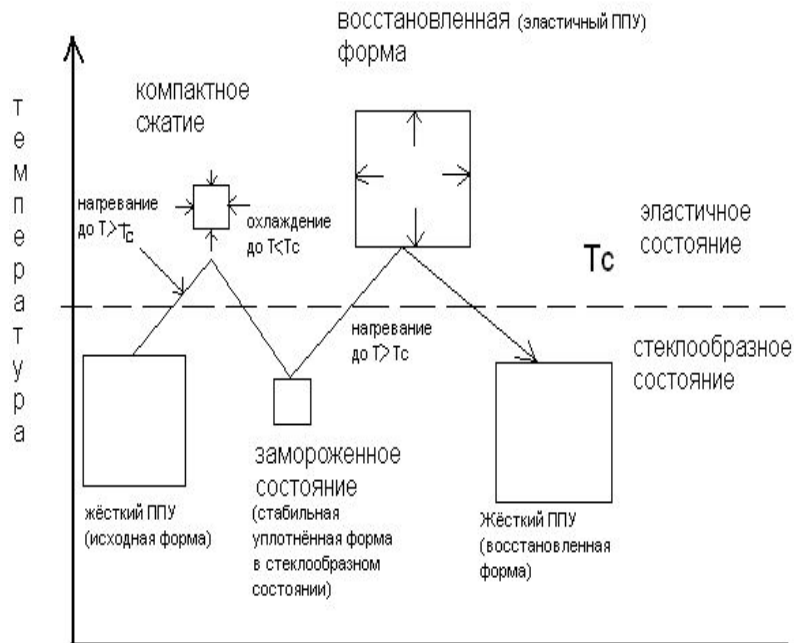
→ **Нагрев** ( $T_{gh} > T_f > T_{gs}$ ) → **Восстановленное высокоэластическое состояние** ( $T_f$ )

→ **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)



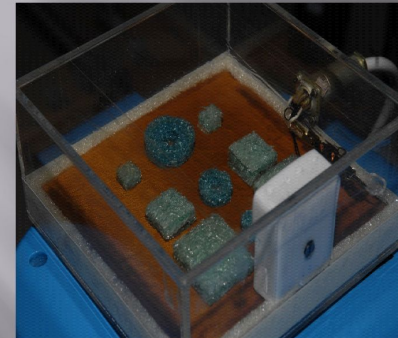
(б)

# Проявление ТС ЭПФ в поропласте из блоксетчатого сополимера сегментированного полиэфируретана и amino-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.



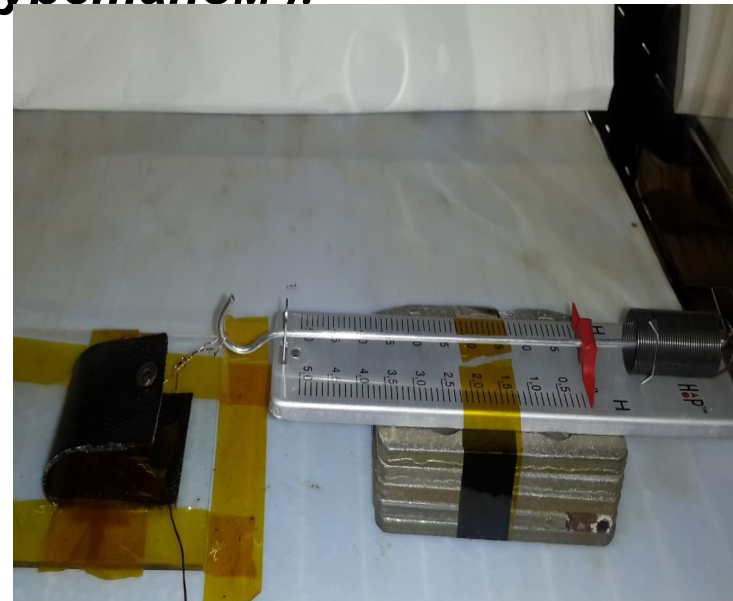
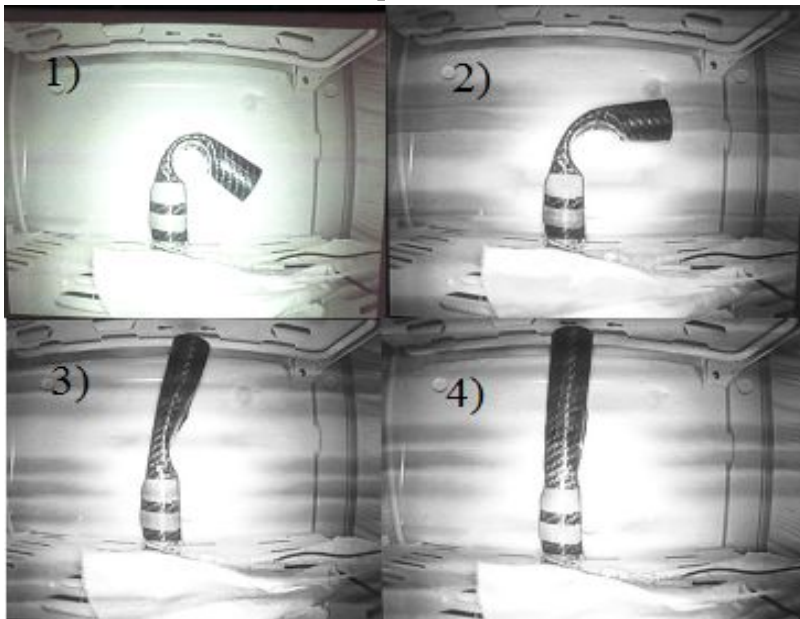
ПЕНАЛ: 1-С ЛЕТНЫМИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИМИ ОБРАЗЦАМИ ДО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ НА БОРТУ РС МКС.

# 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 ):*



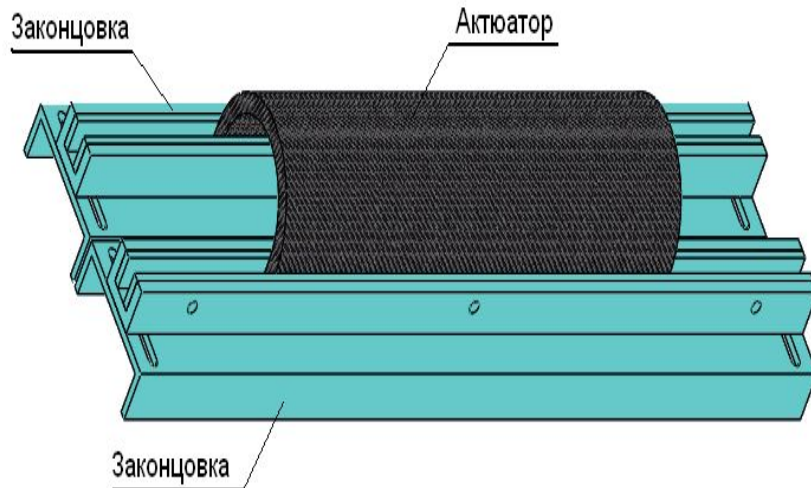


**Проявление ТС ЭПФ в ПКМ на основе углеродной  
ткани и блоксетчатого сополимера  
сегментированного полиэфируретана и амино-  
эпоксидного полимера в условиях микрогравитации  
Научно-образовательный эксперимент на РС МКС**

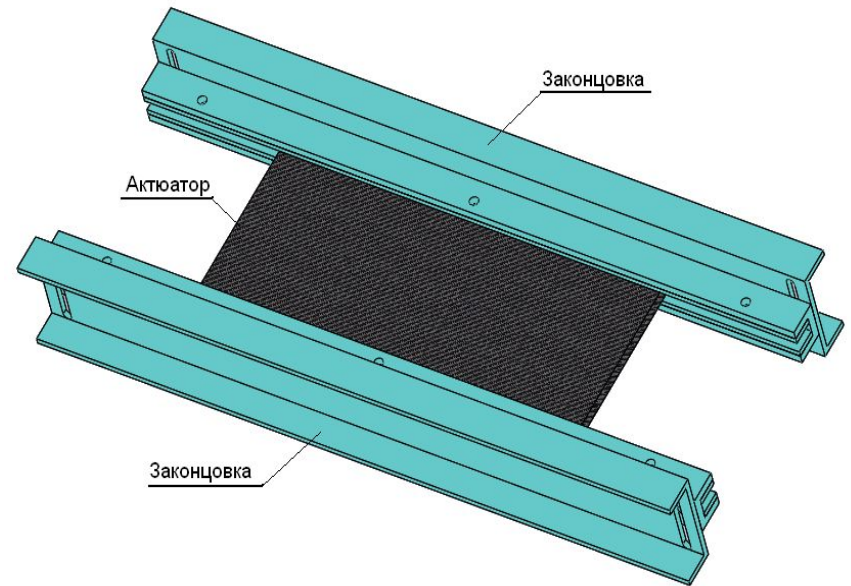


# Модель шарнира из ПКМ в предварительно деформированном и развернутом состоянии

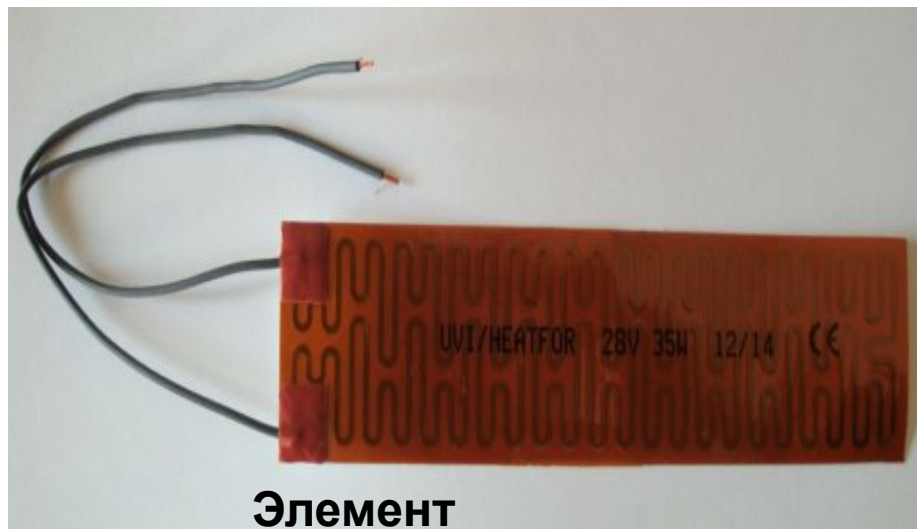
(А)



(Б)



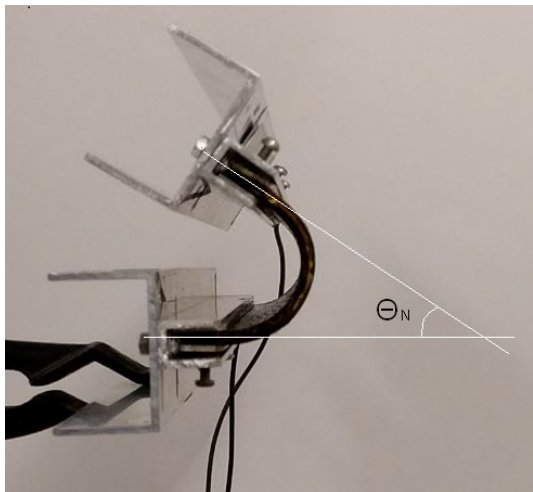
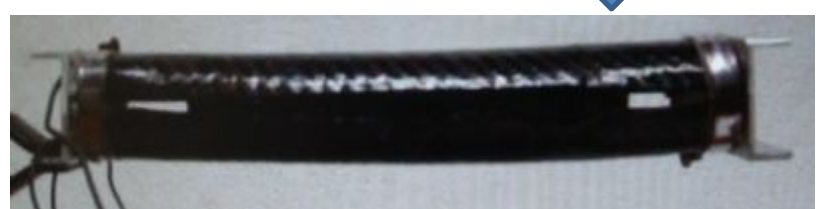
## Составляющие элементы конструкции шарнира



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

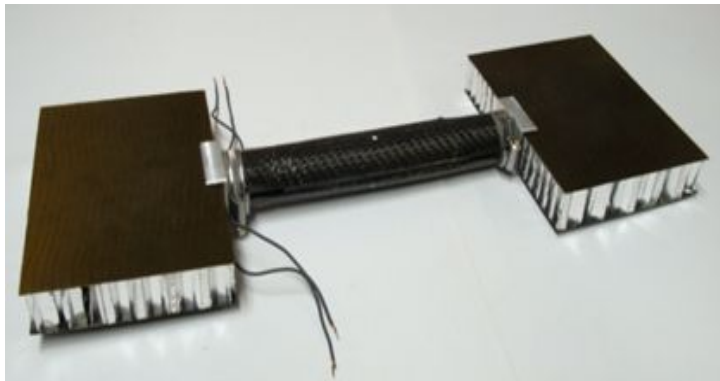
Шарнир в сложенном состоянии

восстановления формы шарнира после подачи напряжения





**А)**

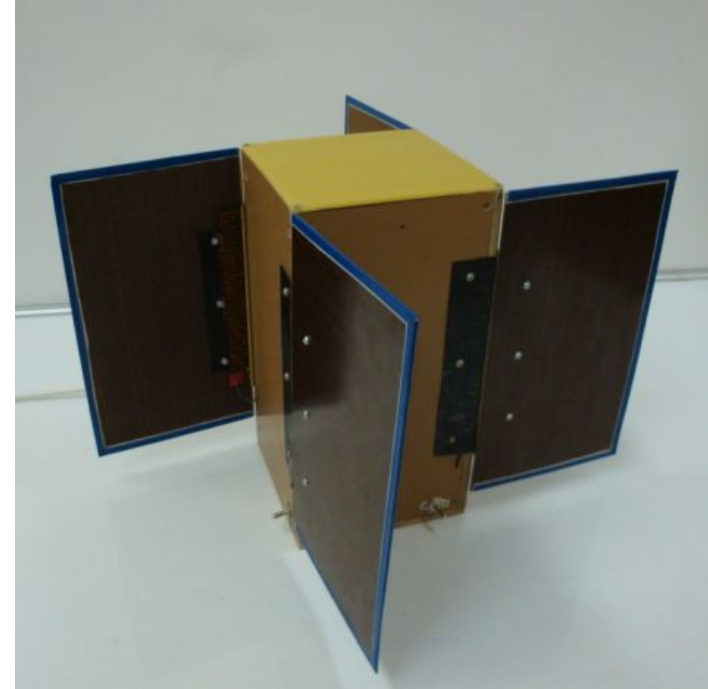
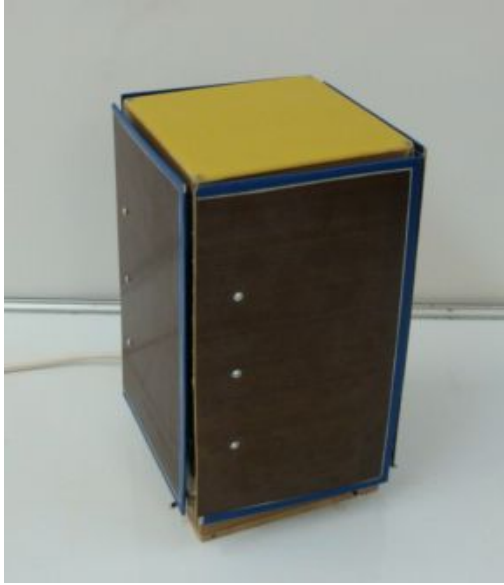


**Б**

**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

