



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)



Институт №11 «Материаловедения и технологии материалов»  
Кафедра «Технологии композиционных материалов конструкций и микросистем»

Лекции по дисциплине

# Материаловедение и технологии конструкционных материалов 2

К.т.н., доц.каф.«ТКМКиМ»  
Червяков А.А.

*Москва, МАИ, 2018 г*



# Раздел 1

## **Общая характеристика авиационных материалов, тенденции их развития**



# Направления развития авиационной техники на современном этапе

Разработка, создание, совершенствование:

- широкофюзеляжных, пассажирский, транспортных самолётов;
- лёгких пассажирских самолётов бизнес-класса на 1-4 пассажира;
- грузовых и малых вертолётов бизнес-класса, скоростных вертолетов;
- дирижаблей;
- сверхзвуковых пассажирских и военных самолётов (истребителей со скоростью полета 3;4;5 и 6 мах);
- БПЛА различной модификации и функциональности;
- космических самолётов; • орбитальных станций;
- ракетоносителей.



# Факторы, обуславливающие развитие НОВОЙ ТЕХНИКИ



Тип ЛА	~Стоимость 1 кг массы в ЛА, \$UD	
	1980-е гг	кон.90-х ÷ 2000е
Транспортные самолёты	50-75	100-150
Пассажирские самолёты	100	200
Двигатели самолётов	100-200	200-400
Истребитель-перехватчик	150-200	300-400
Сверхзвуковой пассажирский самолёт	200-500	400-1000
Спутник на околоземной орбите	1000	2000
Спутник на синхронной орбите	10000	20000
ВКС «Спейс-Шатл»	10000-15000	20000-30000

на март 1993г запуск 1 кг массы спутника на геостационарную орбиту стоил 20 тыс.\$;

в апреле 1992г стоимость двигателя ракетносителя «Энергия» - 500 млн.\$;

снижения массы лопатки ГТД на 1 кг приводит к снижению массы самолёта на 5-8 кг, из-за упрощения и облегчения узла крепления лопатки.

## 3. Экономичность ЛА

ресурс работоспособности современных самолётов более 60тыс. ч.



# Общие требования к авиационным материалам



1. Высокие удельные показатели (прежде всего по механическим свойствам:  $\sigma$ ,  $E$ ):

$$\sigma_{уд} = \sigma/\rho, [\text{кМ}]; E_{уд} = E/\rho, [\text{кМ}]$$

2. Долговечность;
3. Живучесть;
4. Ударостойкость, птецестойкость;
5. Негорючесть;
6. Высокая технологичность и ремонтпригодность;
7. *Для каждого типа летающего объекта предъявляются свои специальные требования*

Например: - по работоспособности при  $T > 300^\circ\text{C}$ ;

- по эрозионной стойкости;
- по стойкости к тепловым ударом
- по радиопрозрачности
- по герметичности и т.д.



# Тенденции в развитии современных материалов

4 крупных класса материалов:

- Металлические (Me);
- Керамические (Ke);
- Углеродные (УМ);
- Полимерные (ПМ).



# Тенденции в развитии современных материалов

Металлические материалы	Керамические материалы	Углеродные материалы	Полимерные материалы
-------------------------	------------------------	----------------------	----------------------

- Разработка лёгких Ме сплавов на основе элементов (Al, Mg, Ti, Be), характеризующихся более высокими значениями  $\sigma_{уд}$  по сравнению со сплавами на основе Fe (стали);
  - Создание монокристаллических Ме;
  - Дисперсно-упрочнённые сплавы;
  - Создание жаропрочных и жаростойких сплавов;
    - на основе Al до 200°C;  $200\text{Å}$ ;
    - Ti до 500°C;
    - Fe до 1000°C;
    - Nb до 1400°C;  $\text{входит в структуру Ме и каким либо}$
    - Ta до 1660°C;
    - Zr до 1700°C
- разработка порошковых технологий;
  - использование Ме со сверхпластичностью;
  - изменение свойств поверхностного слоя Ме за счёт корпускулярной и волновой обработки



# Тенденции в развитии современных материалов



К этому классу относятся все неорганические тугоплавкие составы.  
**Керамика** – неорганические, тугоплавкие соединения оксидного, карбидного, нитридного типов и т.д.

Самая распространённая керамика – оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ )  $T_{\text{пл}} = 1600^\circ\text{C}$ ;

Оксидная керамика	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$
$\text{Be}_2\text{O}_3$	2500
$\text{CaO}$	2550
$\text{HfO}$	2800
Нитридная керамика	
$\text{Zr}_3\text{N}_4$	3000
$\text{Ti}_3\text{N}_4$	3200
$\text{TaN}$	3300
$\text{HfN}$	3500
$\text{B}_3\text{N}$	3750

Карбидная керамика	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$
$\text{Th}_4\text{C}_3$	2800
$\text{WC}$	2850
$\text{TiC}$	3100
$\text{ZrC}$	3550
Боридная керамика	
$\text{HfB}_3$	3050-4150
$\text{WB}$	2900
$\text{ZrB}_4$	2900
Циркониевая керамика	
$\text{BaZrO}_2$	2700
$\text{CaZrO}_2$	2600





# Тенденции в развитии современных материалов



Металлические материалы

Керамические материалы

Углеродные материалы

Полимерные материалы

1. Создание Ке для теплонагруженных конструкций;
2. Создание покрытий для газофазного, диффузионного напыления.  
Позволяет получать сверхтвёрдые, износостойкие, жаростойкие, самосмазывающиеся покрытия;
3. Создание Ке волокон с  $\sigma_p$  до 4 ГПа ,  $E_p$  до 430 ГПа при растяжении и композиционных материалов на их основе;
4. Разработка объёмной керамики для полностью керамических двигателей;
5. Создание высокотемпературной, сверхпроводящей керамики (оксидной : оксиды, Ca,Cu, Ta, Ba, Bi, Sr);
6. Создание Ке полупроводников на основе SiC, GaAs, GaP.



# Тенденции в развитии современных материалов

Металлические материалы	Керамические материалы	<b>Углеродные материалы</b>	Полимерные материалы
-------------------------	------------------------	-----------------------------	----------------------

**Углеродные материалы** – (кокс, графит, уголь) материалы, которые состоят только из углерода в разных физических и фазовых состояниях

1. Разработка различных форм углерода:
  - аморфный углерод;
  - стеклоуглерод;
  - пироуглерод
2. Создание углеродных композиционных материалов и решение проблемы защиты их поверхности от покрытия.



# Тенденции в развитии современных материалов

Металлические материалы	Керамические материалы	Углеродные материалы	<b>Полимерные материалы</b>
-------------------------	------------------------	----------------------	-----------------------------

1. Разработка ПМ с высокими удельными механическими характеристиками с высокими трещино- и термостойкостью;
2. Разработка экологически чистых производств ПМ;
3. Разработка безотходных технологий;
4. Вторичная переработка ПМ;
5. Вопросы уничтожения отходов ПМ;
6. Создание новых типов «умных» ПМ (самоинформирующиеся материалы).

## Объём использования различных материалов в авиации

Материал	Использование, %	
	1980 г.	2000 г.
Al и его сплавы	76	29
Ti и его сплавы	6	11
сталь	8	5
ПМ	5	51
др. материалы	5	4
	100	100

## Объём использование материалов в конструкциях военных самолётов (в %)

Самолёт	Конструкционный ПМ (углепластик)	Al	Ti	Сталь	Др. материалы
F-18	10,3	55,4	8,4	14,1	11,8
AV-8B	26,3	47,8	-	-	25,9
AD-CA	68,5	5,6	8,7	8,0	9,2

# Типы (или классы) материалов

## Простые материалы

- состоят из одного элемента;
- ограниченные возможности по свойствам.

## Сложные материалы

- состоят из нескольких разнородных компонентов;
- каждый из компонентов вносит свой вклад в свойства материала в целом.

### Свойства сложного материала можно направленно изменять:

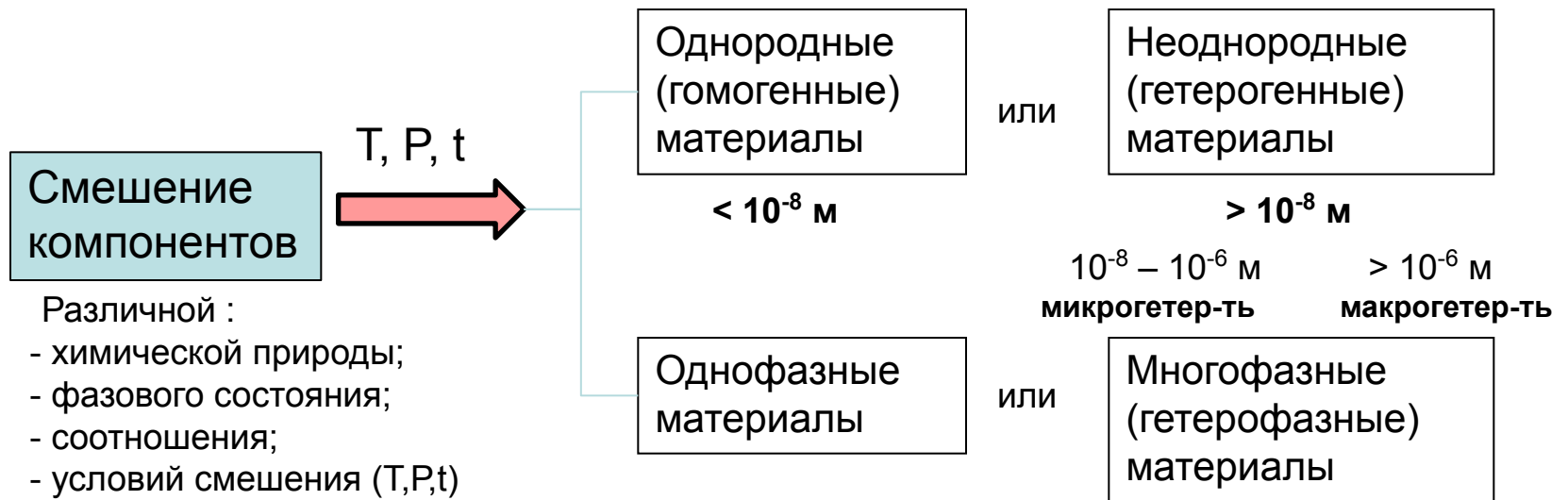
- составом компонентов;
- их количеством;
- взаимным расположением в объеме материала;
- геометрическими размерами компонентов;
- их преимущественной ориентацией

Большая вариабельность составов и свойств материалов  
из одних и тех же компонентов

Для высокопрочных материалов наиболее выгодно использовать компоненты волокнистой формы. Прочность вдоль оси волокна максимальна.

# Основные требования к сложным материалам:

- комбинированием различных материалов получают новый с более сложной структурой, но компоненты сохраняют свою индивидуальность;
- наличие границы раздела между компонентами



## Основной признак композиционного материала:

- неоднородность по структуре (гетерогенность);
- неоднородность по фазовому составу (гетерофазность);
- наличие общей границы раздела;
- фазы сохраняют индивидуальность.

Критерий гетерогенности – размер частиц.

# Композиционные материалы (КМ)

## Определение:

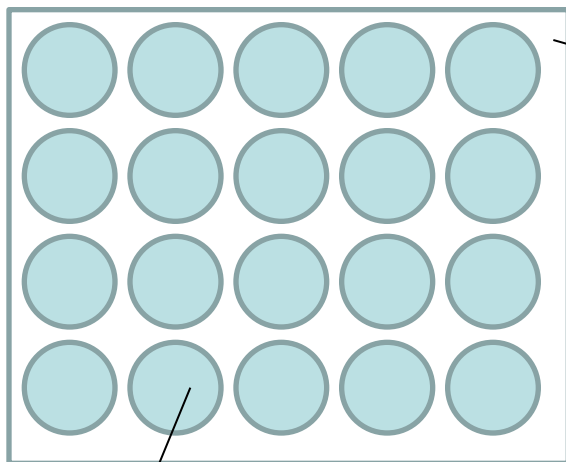
КМ – это природный или искусственно созданный гетерогенный, гетерофазный материал, состоящий из двух или более компонентов,

- разнородных несмешивающихся друг в друге,
- нерастворимых друг в друге,
- образующих самостоятельные фазы,
- соединённые между собой физическими или химическими связями,
- имеющие общую границу раздела (межфазный слой),

и обладающий новым сочетанием свойств, но сохраняющий индивидуальность каждого компонента.

Компоненты не изменяют свои свойства, каждый вносит свой вклад, но материал приобретает новый комплекс свойств.

С т.з. физико-химии это гетерогенные и гетерофазные структуры



1 фаза – непрерывная фаза  
(дисперсионная среда) или матрица.

## **Функции матрицы:**

- фиксировать в пространстве частички наполнителя;
- удерживать форму изделия;
- передавать и перераспределять внешнюю нагрузку на частицы наполнителя;
- обеспечивать технологические свойства;
- защищать частицы наполнителя от воздействия внешней среды

2 фаза – дисперсная фаза, которая м.б. дискретной или непрерывной (прерывной, непрерывной), распределена по заданному закону в непрерывной фазе – наполнитель.

## **Функции наполнителя:**

- обеспечивать заданные эксплуатационные свойства;
- определяет технологические приёмы изготовления изделия.

Граница раздела фаз (межфазный слой) – определяет совместную работу матрицы и наполнителя

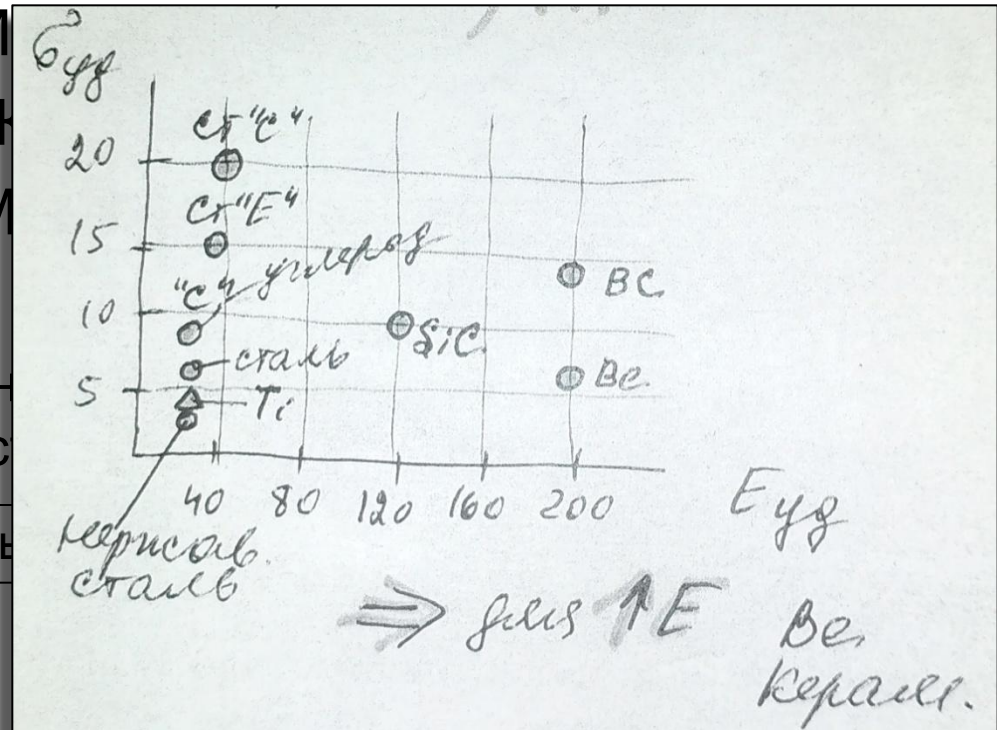


В зависимости от природы одного из компонентов (как правило матрицы):

- Металлические КМ – МКМ
- Керамические КМ – КМКМ
- Полимерные КМ – ПКМ
- Углеродные КМ – УМКМ

У каждого класса свои достоинства и недостатки применения, т.е. возможности

Для ЛА нужны прочные материалы



1. Химическая связь	Энергия связи, кДж/моль
Ионная	590-1050
Ковалентная	до 710
Металлическая	110-350
2. Физическая связь	
Ван-Дер-вальсовая	2-40
Водородная	до 710

$$\sigma_{теор.св} \sim \frac{1}{\sqrt{a}}, \quad a = f(R_{атома})$$

Маленький  $R_{атома}$  – у лёгких элементов. Для конструкционных целей необходимо использовать легкие элементы из таблицы Менделеева

# Применение конструкционных материалов в мире (%)

Материал	1980	1990	2000	2020 (прогноз)
Me	70	57	44	25
ПМ	14	18	22	32
КМ	6	12	14	18
Ке	10	13	20	25

## Основные области применения неметаллических материалов в конструкциях ЛА

- Конструктивные элементы:** элементы фюзеляжа; отсеки фюзеляжа; полностью крылья или их части (передняя кромка, закрылки, элероны, стабилизаторы, оперения); винтовые лопасти; полностью планеры легковых самолётов и др..
- Тормозные устройства:** диски, колодки.
- Всевозможные материалы для герметизации и склеивания элементов
- Декоративные элементы ЛА** (полы, перегородки, сиденья, обивки и др.)
- Узлы и агрегаты авиационных двигателей:** лопатки, корпуса компрессора и вентилятора, воздухопроводы, диски статора и ротора компрессора низкого давления, подшипники, защитные экраны, сопло дефлектора и др.



# Рекомендуемая литература



1. Любин Дж. Справочник по композиционным материалам. Пер. с англ./ Под ред. А.Б. Геллера. в двух томах– М.: Машиностроение, 1988. – 448с.
2. Технология производства изделий и интегральных конструкций из КМ в машиностроении\_А.Г.Братухин, В.С.Боголюбов, О.С.Сироткин – М.: Готика, 2003. - – 516 с.
3. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 822 с.
4. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. – СПб.: Научные основы и технологии, 2011. – 660 с.
5. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. – СПб.: Научные основы и технологии, 2013. – 650 с.
6. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: Учебное пособие. 4-е издание. /Под ред. Берлина А.А. – СПб.: Профессия, 2014. – 560 с.
7. Мийченко И.П.. Технология полуфабрикатов полимерных материалов. – СПб.: НОТ, 2012. – 374 с.
8. Промышленные полимерные композиционные материалы. Ричардсон. Пер. с англ. Под ред. Бабаевского. М.: Химия . 1980. – 472 с.
9. Устинов В.А. Тенденции использования КМ на полимерной матрице в авиационной и космической технике за рубежом//Проблемы безопасности полетов.-1995.-№ 1.- С.19-36.
10. Faserverstaerkte Kunststoffe, Zukunftwerkstoffe fuer den Maschinen- und Fahrzeugbau// Ing. Dig.-1982.- Bd. 21, N 2.- S. 29-31.
11. SAMPE-Journal.-1991.-V. 27, N 2.- P. 19-25.
12. Konstruieren mit thermoplastischen Kunststoffen. Teil 1: Grundlagen. Ludwigshafen: BASF.-S. 76.