

Термо-и радиационностойкие полимерные матрицы для композиционных материалов



А.А. Кузнецов

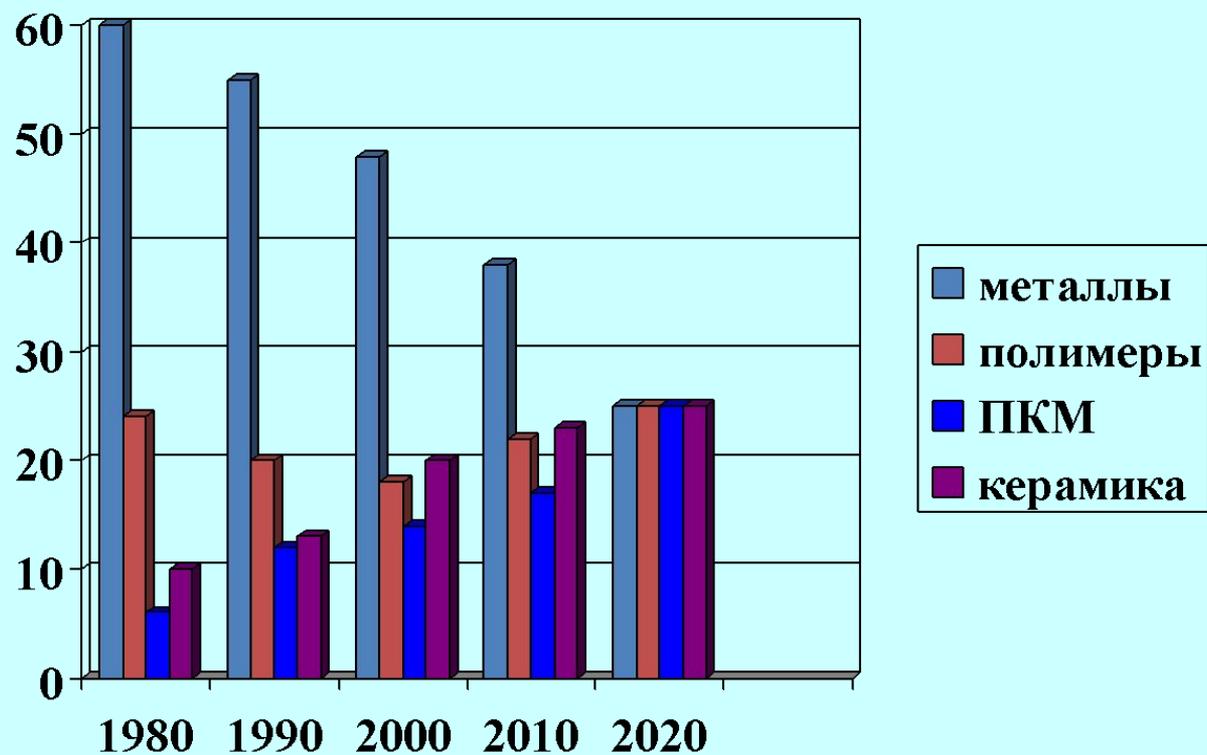
kuznets24@yandex.ru

Институт синтетических полимерных материалов
им. Н.С. Ениколопова (ИСПМ) РАН, Москва

План доклада

- 1) *Требования к связующим для ПКМ*
- 2) *Термо- радиационностойкие термоотверждаемые связующие;*
- 3) *Термо- радиационностойкие термопластичные связующие;*
- 4) *Полиимидные материалы;*
- 5) *Полицианураты;*
- 6) *Перспективные разработки.*

Доля полимеров и ПКМ на рынке конструкционных материалов



Классификация полимерных композиционных материалов

По применению :

ПКМ конструкционного назначения

- механически прочные

ПКМ функционального назначения

- антифрикционные
- с низкой теплопроводностью
- с высокой теплопроводностью
- радиозащитные
- диэлектрические
- электроактивные
- антибаллистическая защита
- огнезащитные.и т.д.

По типу второго компонента

Непрерывные волокна (ткани)+полимерное

связующее ;

Дискретные частицы + полимерная матрица

Тип полимерного компонента

- термопластичный
- термоотверждаемый

Материал второго компонента

- стекловолокно, углеродное волокно, арамидное волокно, базальтовое,

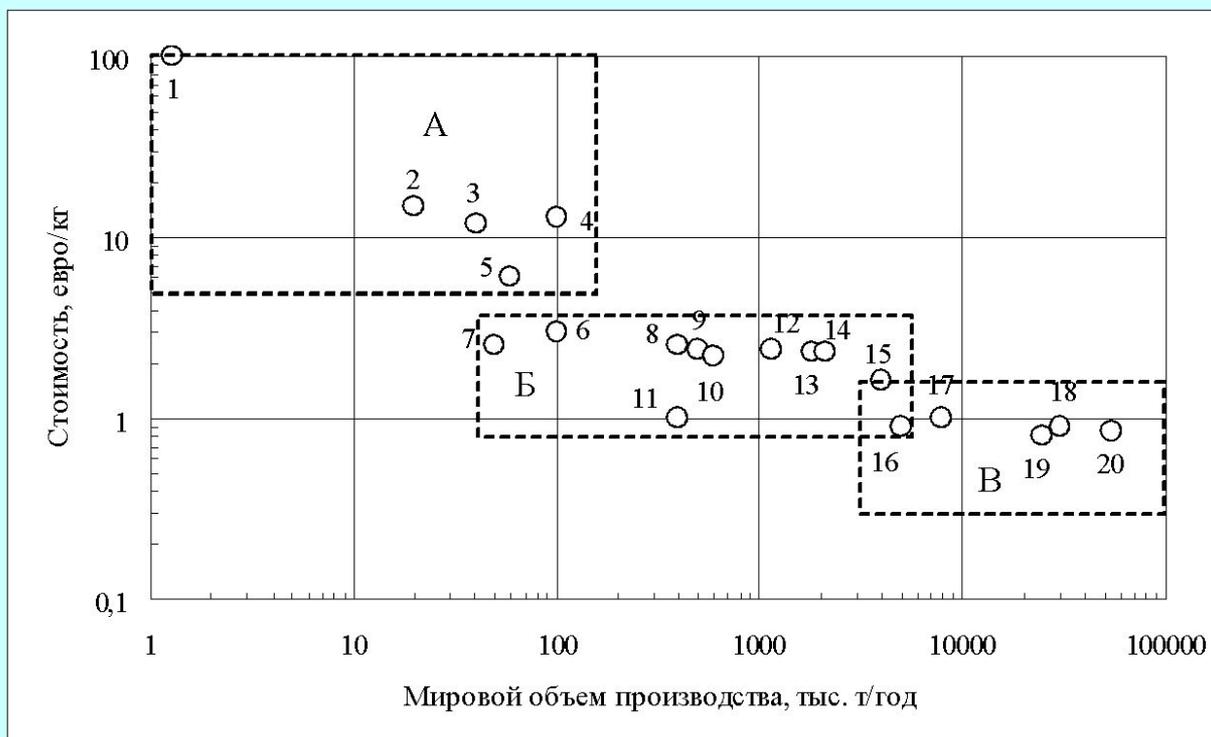
Размер второго компонента

- КОМПОЗИТЫ
- наноккомпозиты 10-100 нм

Форма наполнителя

(сферы, усы, волокна, нанотрубки и т.д.)

Соотношение «мировой объем производства-цена» для конструкционных полимеров



1-ПЭЭК; 2-ЖКП; 3-ПЭС, ПЭИ; 4-ПТФЭ; 5-ПФС; 6-ПЭТФ; 7-ПК+ПБТФ; 8-ПБТФ; 9-ПК+АБС; 10-ПОМ; 11-САН; 12-ПММА; 13-ПК; 14-ПА; 15-АБС; 16-ПС; 17-ПЭТФ-пл; 18-ПП; 19-ПВХ; 20-ПЭ

Роль связующего (матрицы) в ПКМ

- обеспечить возможность изготовления изделия из ПКМ нужной формы;
- передать нагрузку от одного элемента к другому;
- поглотить энергию при ударе;

Характеристики: модуль, прочность при разрушении, удлинение, устойчивость к растрескиванию, температурный диапазон эксплуатации, огнестойкость, влагопоглощение, ктлр, гидrolитическая стойкость, радиационная стойкость.

Мультимерные связующие и матрицы для ПКМ (1- поколение)

Термоотверждаемые

(для ПКМ с непрерывными
волокнистыми матрицами)

- фенольные смолы $T_g = 180^{\circ}\text{C}$
- полиэфирные смолы $T_g = 80-100^{\circ}\text{C}$;
- винилэфирные смолы $T_g = 50-80^{\circ}\text{C}$,
- эпоксидные смолы $T_g = 100-160^{\circ}\text{C}$;

Термопластичные

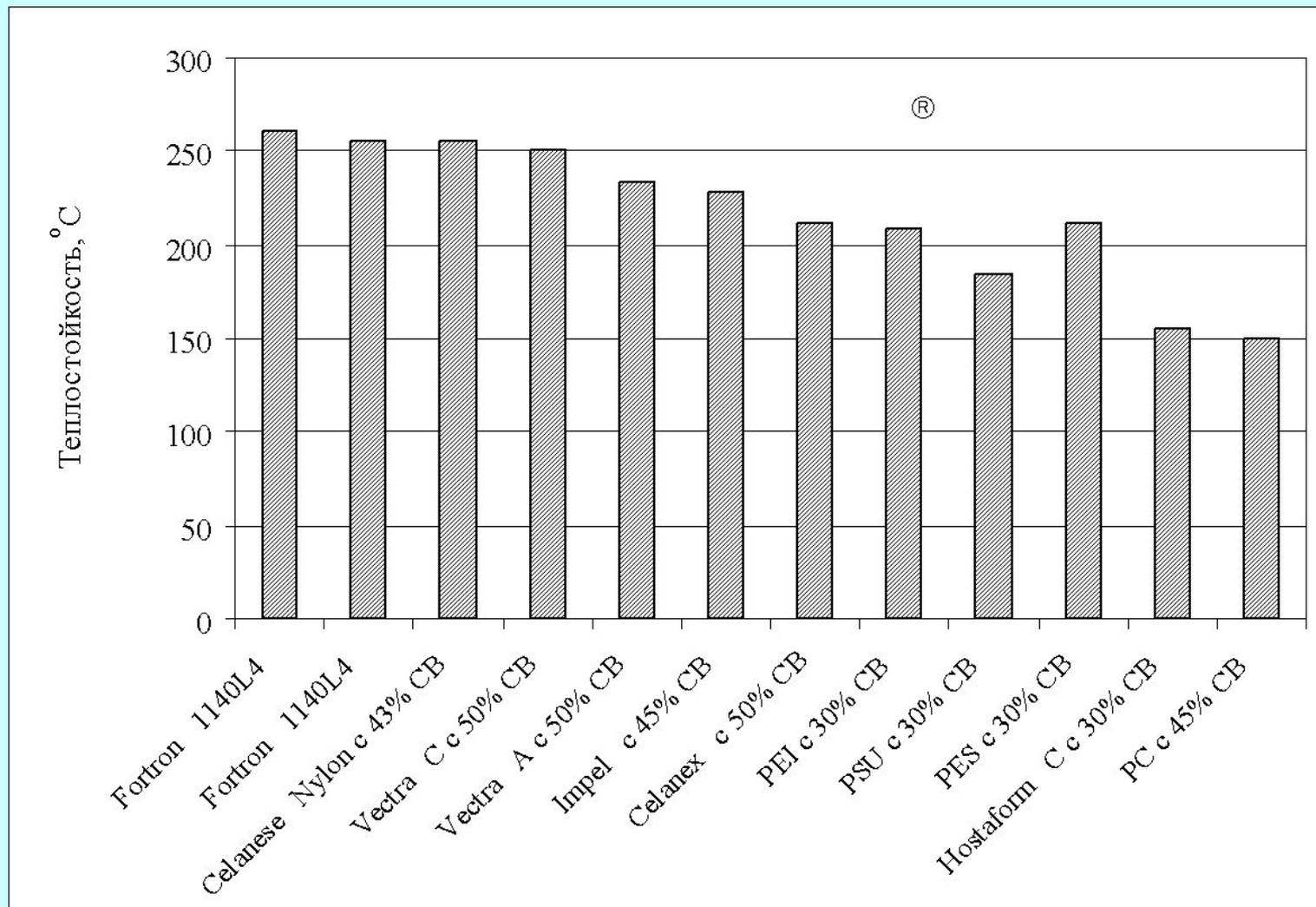
(для ПКМ с дискретными частицами)

- полиамид 6 $T_g = 70^{\circ}\text{C}$ (216°C)
- Полипропилен $T_g = 50^{\circ}\text{C}$ (160°C)
- Полиоксиметилен $T_g = 124^{\circ}\text{C}$ (168°C)
-
- полиамид 66 $T_g = 80^{\circ}\text{C}$ (260°C)
- Полибутилентерефталат $T_g = 55^{\circ}\text{C}$ (232°C)

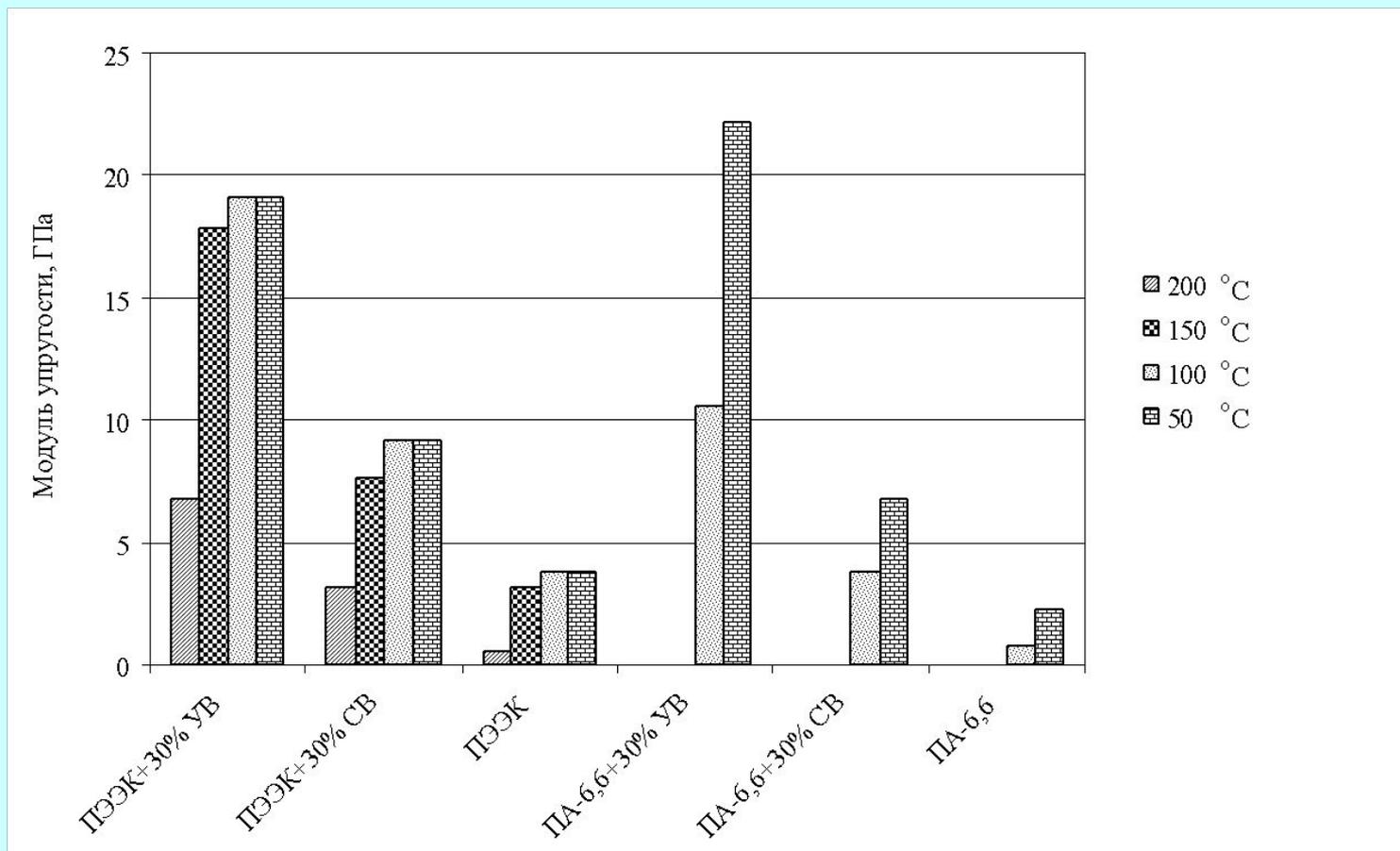
Термоотверждаемые связующие для ПКМ для высокотехнологичных применений: Технические требования:

1)	Температурный диапазон	(-50-150 C)	➔	-196 - +200-350 ⁰ C
2)	Устойчивость к растрескиванию,			
	G1 _c , J/m	200	➔	600-1000
1)	Кислородный индекс	<u>20</u>	➔	45
2)	Плотность дыма/токсичность	<u>2000</u>	➔	100
3)	Радиационная стойкость, МРад	100	➔	1000
4)	Химическая стойкость	средняя	➔	улучшенная
5)	Устойчивость к абляции	средняя	➔	улучшенная
6)	Влагопоглощение%	5-10	➔	<1
7)	Переработка	автоклав	➔	без автоклава
8)	Цена	< \$15	➔	< \$15 - <\$100

Долговременная теплостойкость ПКМ на основе термопластичных матриц –



Влияние наполнителя на модуль упругости ПКМ на основе ПЭЭК при разных температурах



2004: Новые требования к показателям огнестойкости материалов и элементов конструкции пассажирских самолетов АП25 (FAR-25, JAR)

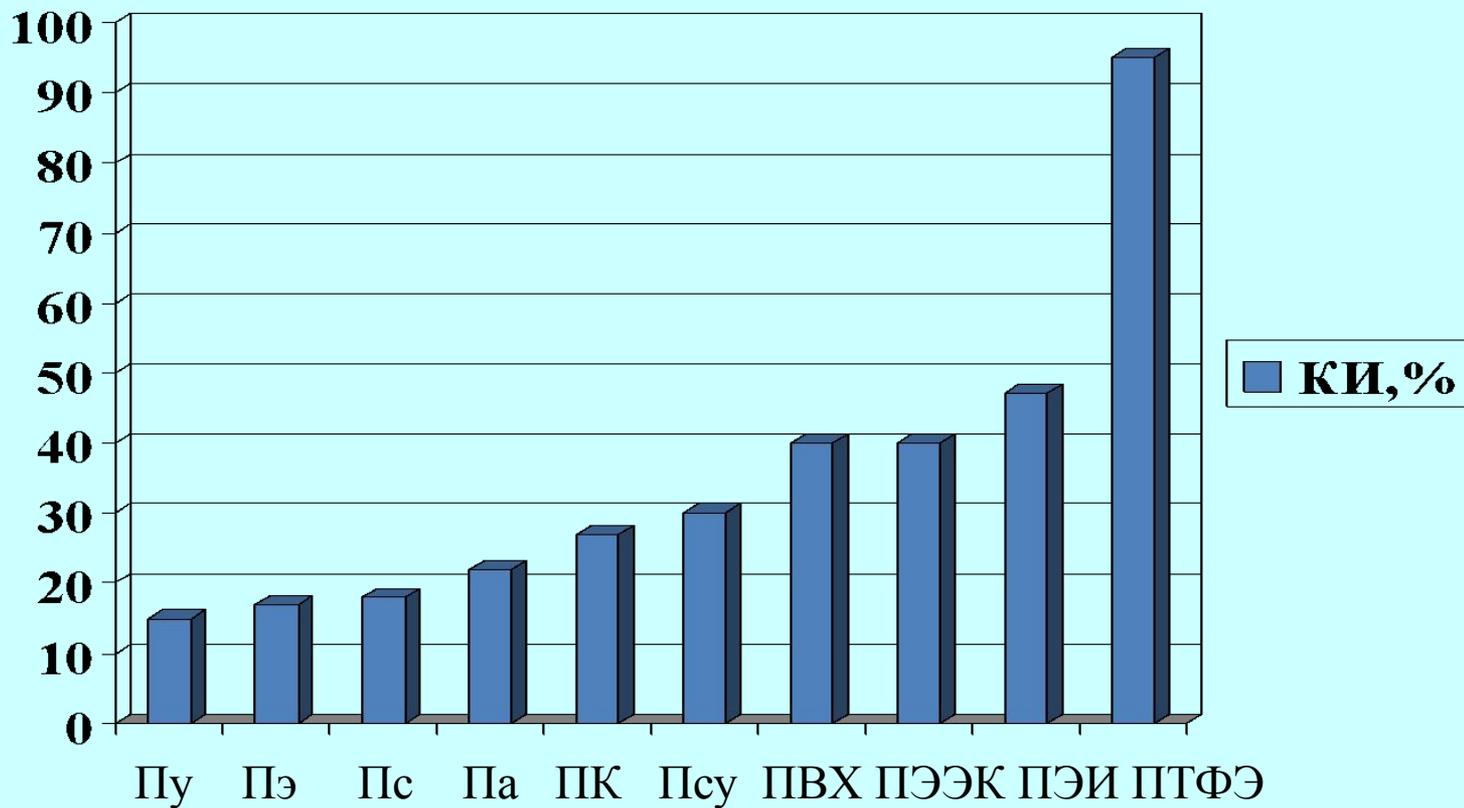
1- горючесть: затухание за 15 с после поджига 60с;

2-дымовыделение плотность дыма после 4 мин горения менее 200 ед. ;

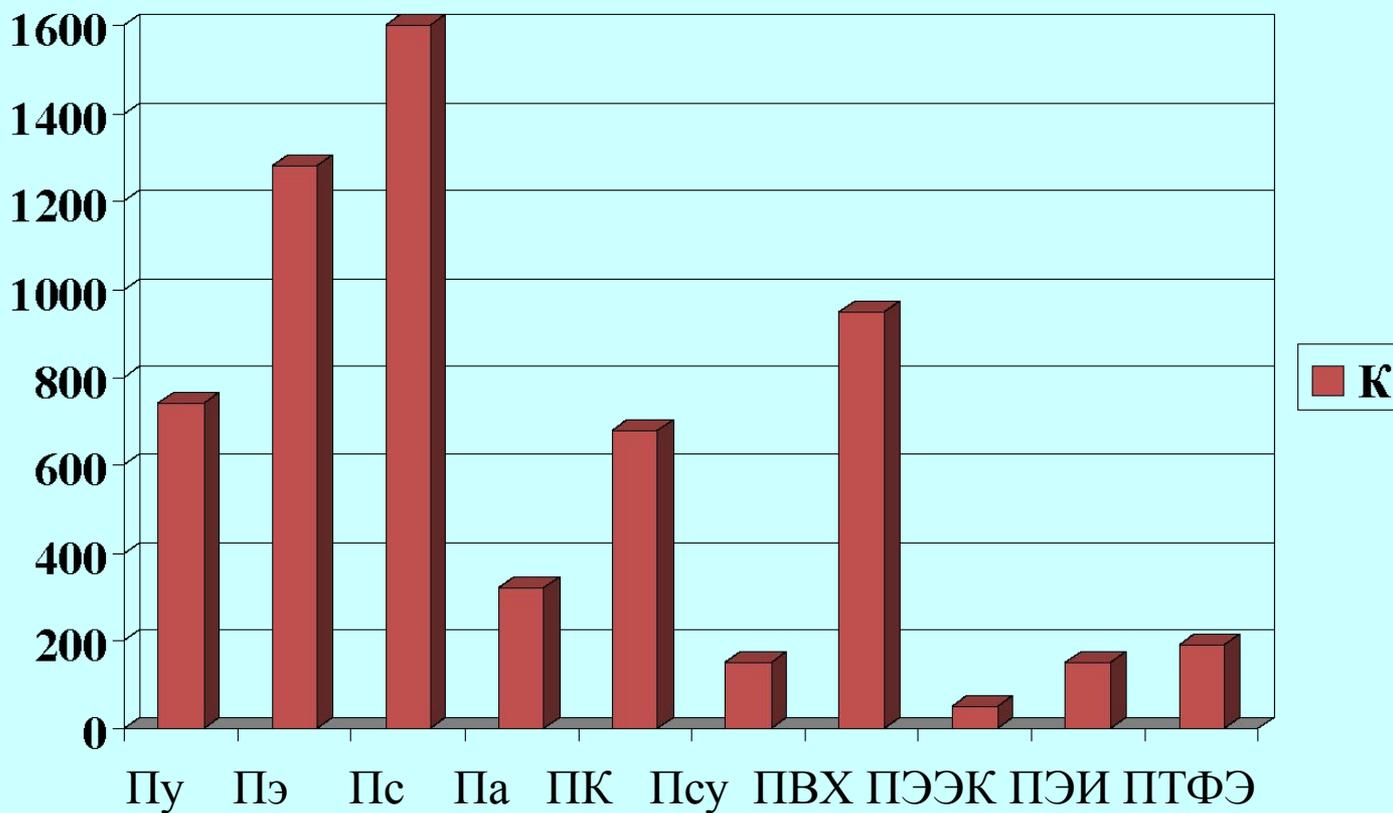
3- тепловыделение $<65 \text{ кВт*мин/м}^2$

(для ЖКП Vectra A950 $16,8 \text{ кВт*мин/м}^2$)

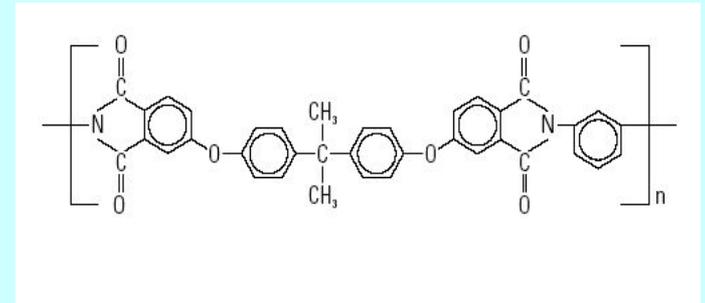
Кислородный индекс термопластов, %



Показатель дымообразования, м³/кг



Полиэфиримид Ultem-1000



Механические свойства: $E=3$ ГПа, $\sigma=100$ МПа, $\epsilon=50\%$;

Ударная прочность;

Криогеностойкость ;

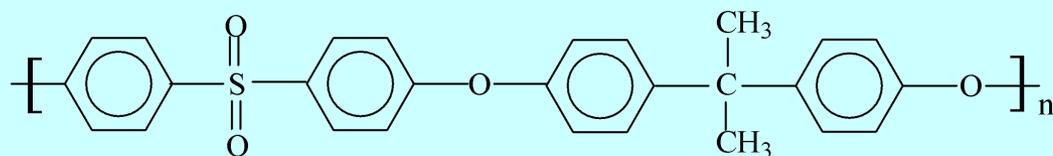
Диэлектрические свойства: $\epsilon=3.2$;

Огнестойкость КИ=47;

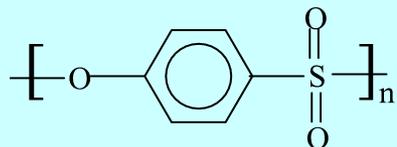
Радиационная стойкость;

Перерабатываемость через расплав при 320°C

Полисульфоны

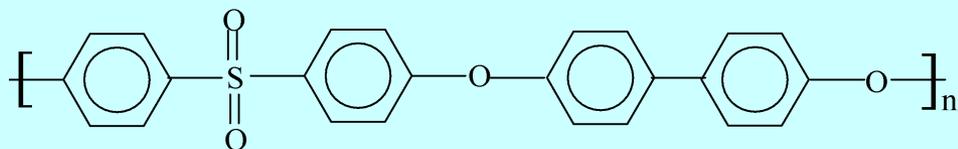


$T_g = 174\text{--}190^\circ\text{C}$; ПСН, Udel 1700
(Solvay), Ultrason PSU(BASF)



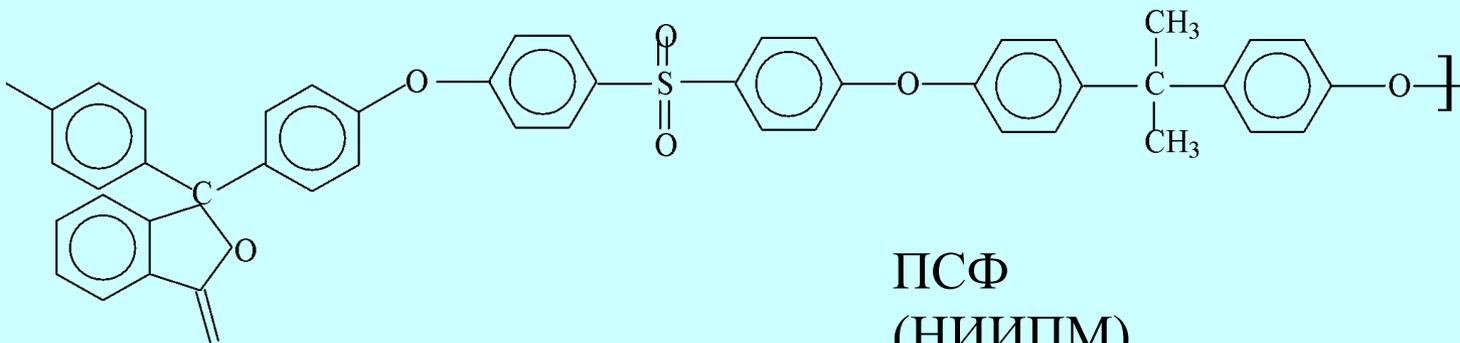
$T_g = 230^\circ\text{C}$; $T_9 = 200^\circ\text{C}$;

Victrex PES, Ultrason PESU (BASF)



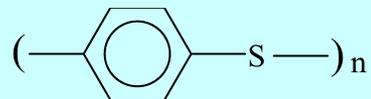
Ultrason PPSU(BASF); Radel R
(Solvay)

Высокая ударная прочность, гидролитическая стойкость



ПСФ
(НИИПМ)

Полифениленсульфид

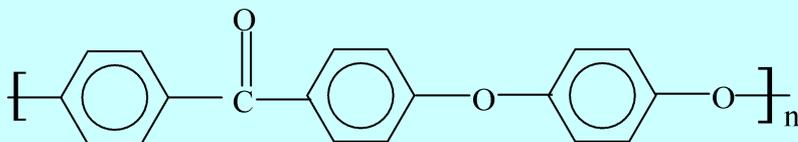


Fortron (Ticona), Primef PPS (Solvay)

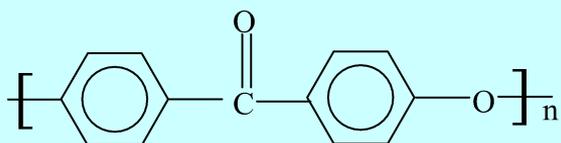
$T_g = 250^\circ\text{C}$, частично кристаллический, высокая химическая стойкость, низкое влагопоглощение, хорошая адгезия к металлу

Объем производства в 2004: 40 000 т.т.

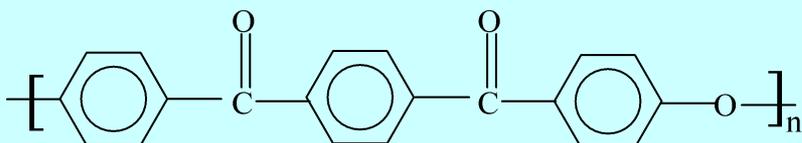
Полиэфиркетоны



ПЭЭК, $T_g = 142^\circ\text{C}$, $T_{\text{пл}} = 330^\circ\text{-}344^\circ\text{C}$
 Victrex PEEK (Victrex), AvaSpare,
 KetaSpire (Solvay), LNP Therocomp
 PEEK (Sabic Innovative Plastics) и др.



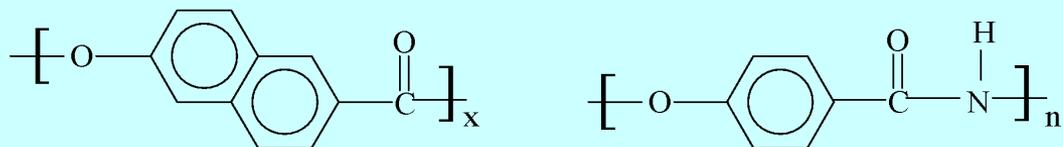
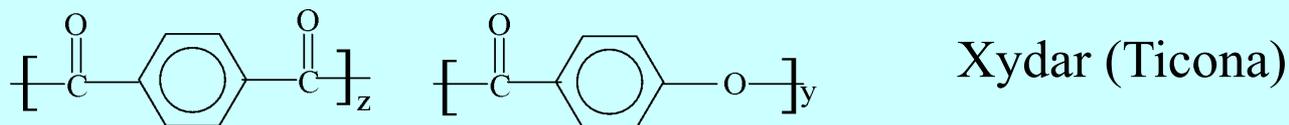
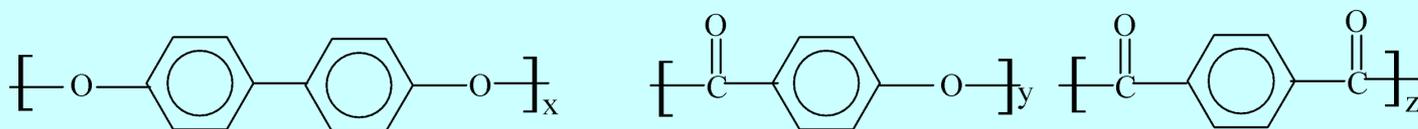
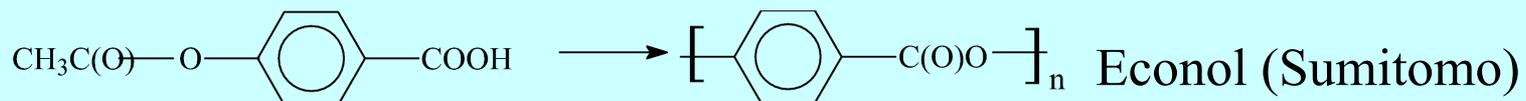
ПЭК, $T_g = 155^\circ\text{C}$, $T_{\text{пл}} = 355^\circ\text{-}374^\circ\text{C}$;
 Victrex HT (Victrex); $T_g = 250^\circ\text{C}$



ПЭКК $T_g = 155^\circ\text{C}$,
 $T_{\text{пл}} = 355^\circ\text{-}374^\circ\text{C}$;
 OxPEKK (Oxford Performance
 Products); $T_g = 250^\circ\text{C}$

Химическая стойкость, стойкость к гидролизу и высокие ударные характеристики, огнестойкость.

ЖК-полиэфиры:



прирост 10-15% в год

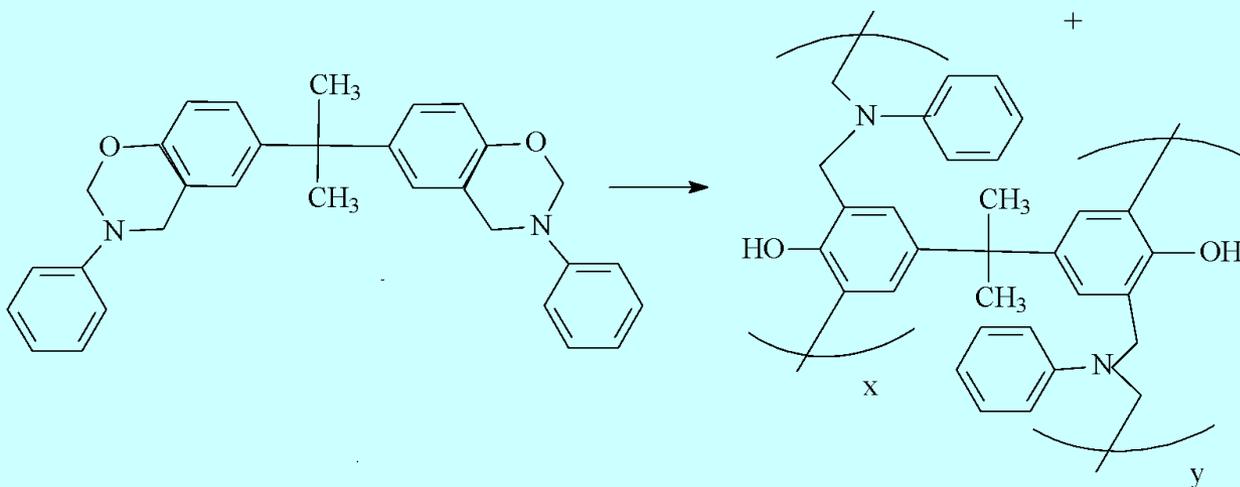
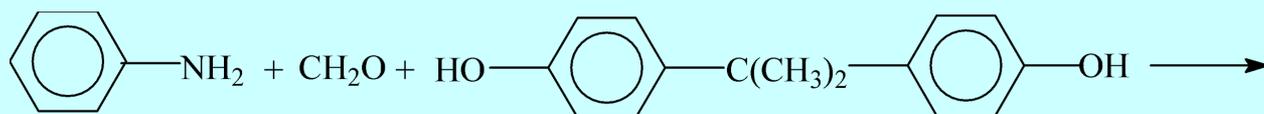
\$15-20/кг

Высокий модуль, низкая вязкость расплава, огнестойкость

Смеси с другими термопластами.

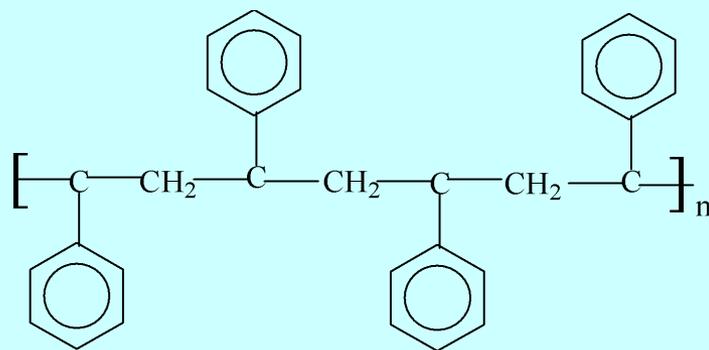
Фирмы-производители	Объем выпуска ЖКП в 2005 г.,т	Торговые марки
Ticona/Polyplastics	8400/4800	Vectra
Du Pont	5000	Zenite
Sumitomo Chemicals	4000	Sumikasuper
Solvay	2000	Xydar
Veno	2000	Veno LCP
Toray ⁴⁾	1300	Siveras
Sonstige	1000	Rodrun, Novaccurate

Бензоксазины



$T_9 = 200^{\circ}\text{C}$, низкая усадка

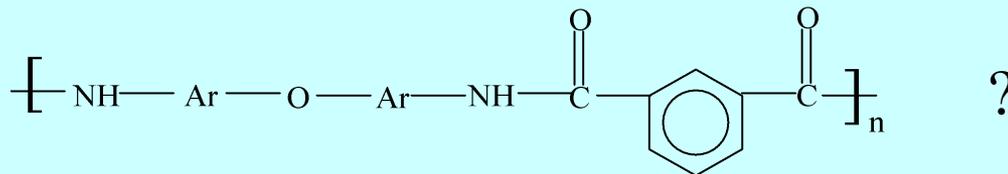
Синдиотактический полистирол



Laestra (Lati), Xarec (Idemitsu)

$T_g = 100^{\circ}\text{C}$, $T_{пл} = 260^{\circ}\text{C}$ Прочный, жесткий, для точного литья, маслобензостойкий

Полифталамид



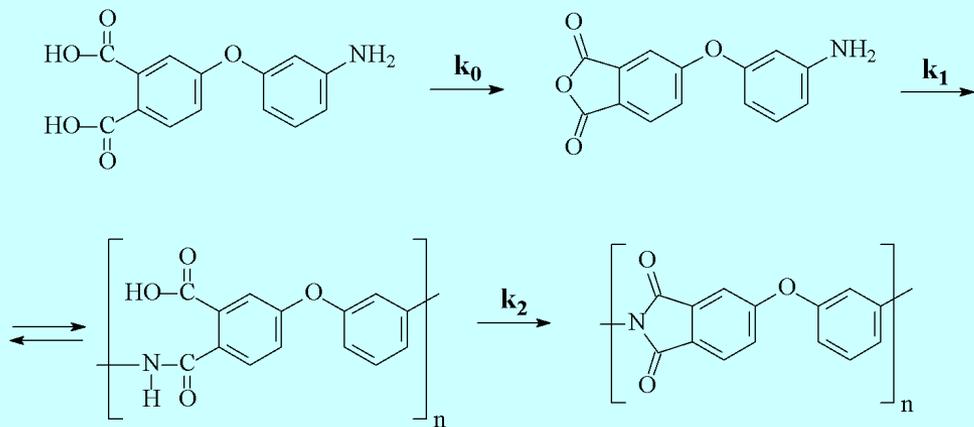
$T_{\text{пл}} = 313^{\circ}\text{C}$ (Amodel, Solvay)

$T_{\text{пл}} = 300^{\circ}\text{C}$ (Zytel HTN, DuPont)

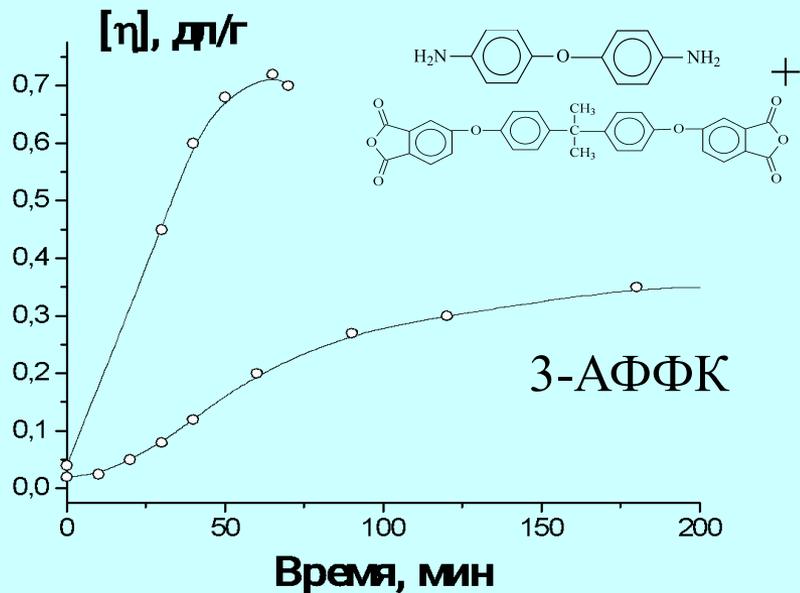
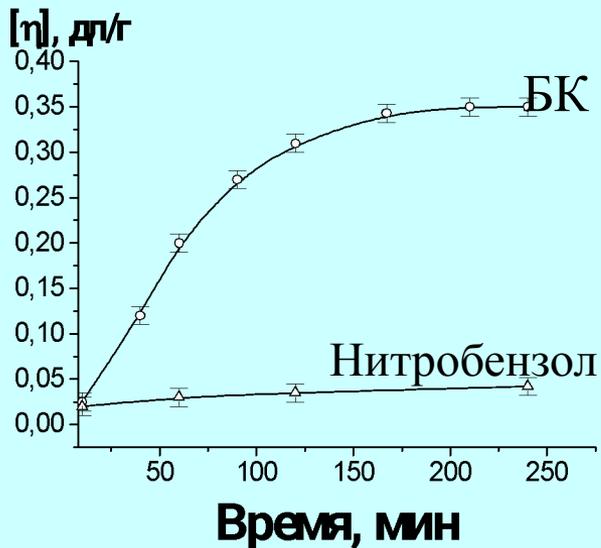
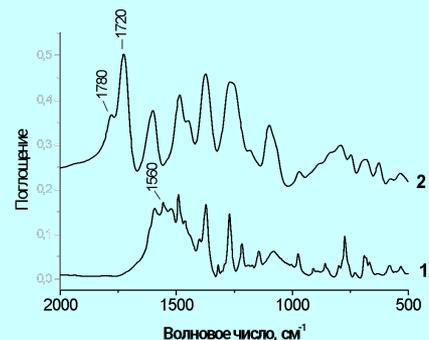
Полиамидоимид. Torlon (Solvay)

Прочный, жесткий полимер аморфной структуры, работоспособен от криогенных температур до 275°C , низкое значение клтр

Синтез полиэфиримидов на основе 3-АФК в «активной» среде

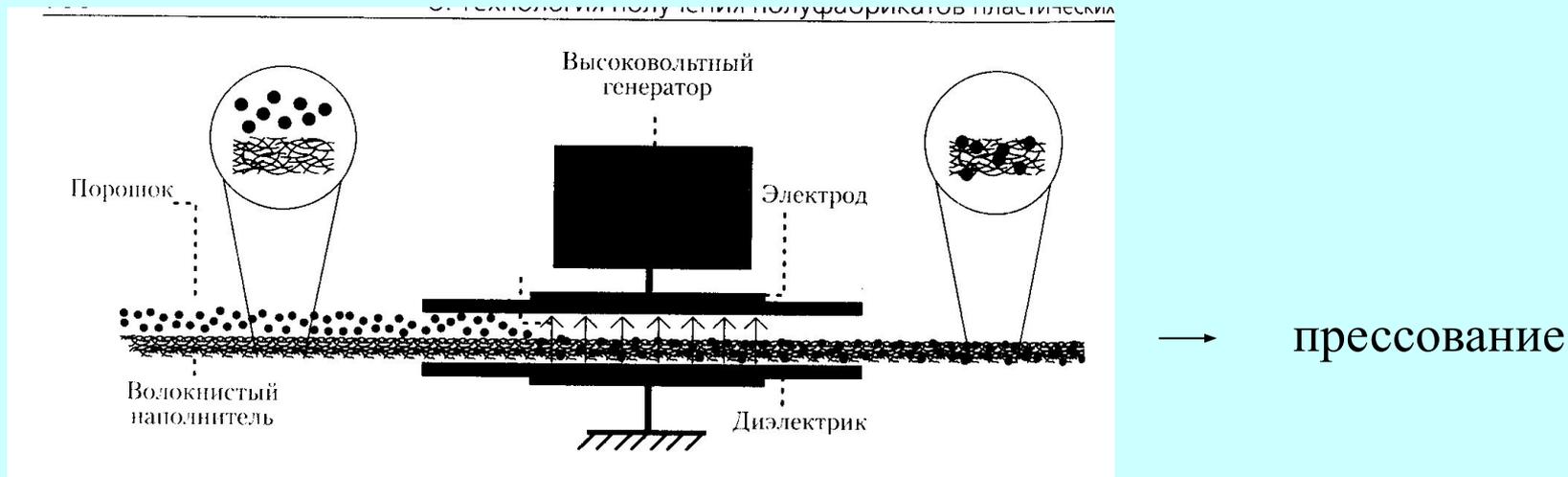


$[\eta]=0,36$ длг
 $T_g=230^{\circ}\text{C}$
 Растворим:
 CHCl_3 , ДМАА
 N-МП, ДМСО



Твердые полимерные связующие

1) Нанесение связующего в виде порошка



2) Нанесение в виде пленки: послойная выкладка с последующим прессованием (RFI);

3) Прессование гибридных тканей: армирующее волокно/термопласт

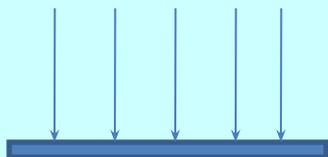
М.Л.Кербер, В.М.Виноградов и др. , под ред. А.А.Берлина

Полимерные композиционные материалы: свойства, структура, технологии,

СПб: Профессия. 2008 -560 с.

Схема получения слоистого ПКМ на основе термоотверждаемого связующего и углеткани

1. Пропитка

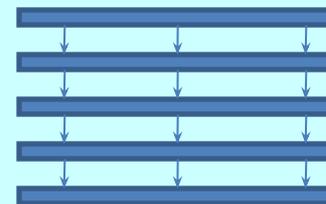


Углеткань

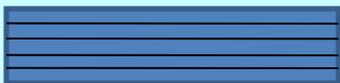
2. Получение препрега

Прогрев в печи при 150⁰С

3. Набор 20 слоев препрега



6. ГОТОВЫЙ ПКМ



5. Пост-отверждение 2

Ступенчатый прогрев в печи 170 – 250⁰С

4. Пост-отверждение 1

Ступенчатый нагрев 120 - 170⁰С под давлением 20 МПа

Способы пропитки связующим и формования изделия из ПКМ

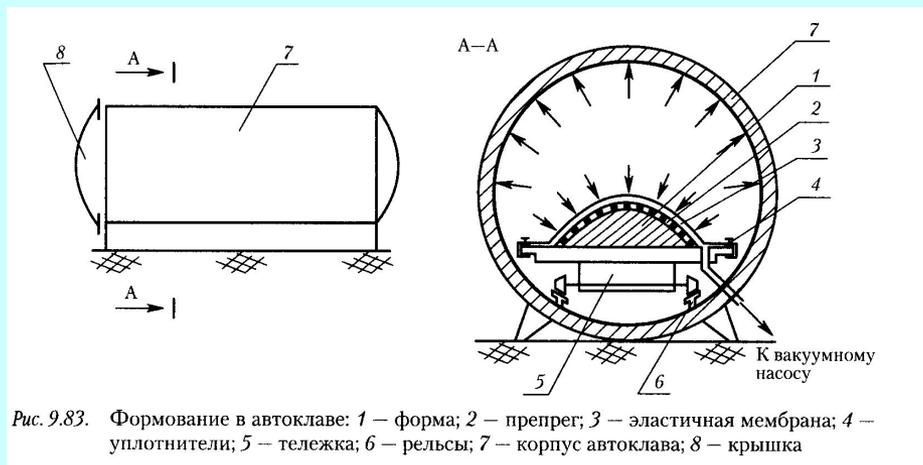
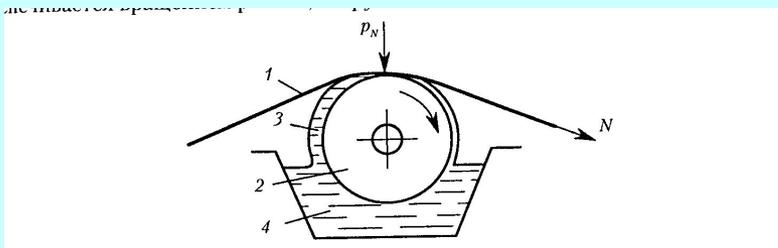
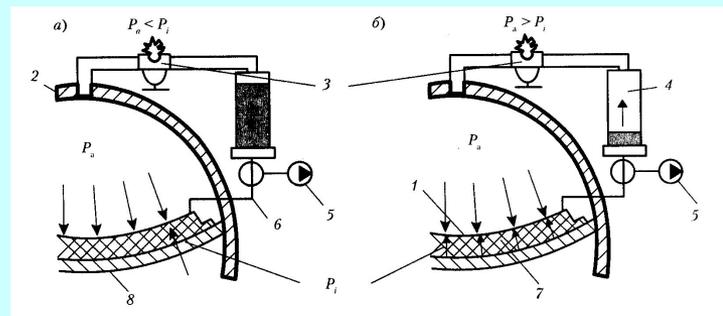
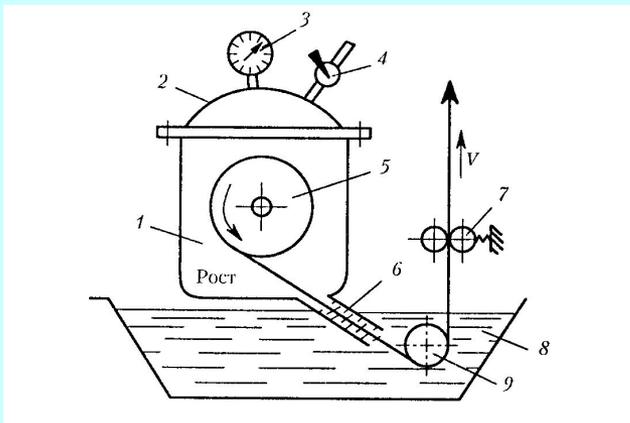
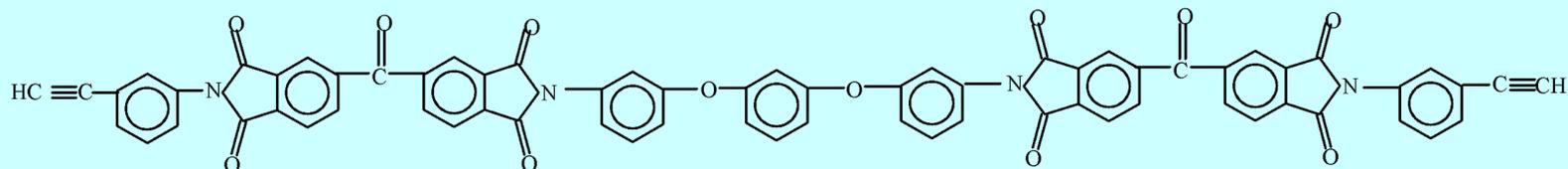


Рис. 9.83. Формование в автоклаве: 1 – форма; 2 – препрег; 3 – эластичная мембрана; 4 – уплотнители; 5 – тележка; 6 – рельсы; 7 – корпус автоклава; 8 – крышка

М.Л.Кербер, В.М.Виноградов и др. , под ред. А.А.Берлина
 Полимерные композиционные материалы: свойства, структура,
 технологии, СПб: Профессия.2008 -560 с.

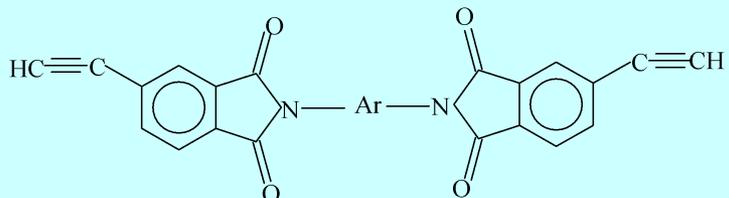
Матрица	G_{1c} , кДж/м ²	Матрица	G_{1c} , Дж/м ²
Торлон 4000Т	3990	ЭД-20+ДЭТА	130-250
ПИ 2080	920	БМИ Матримид 5292	250
Полисульфон	1700	PMR15	230-285
Полиэфирсульфон	1100	Скайбонд	410
ПЭИ	1000-1900	Теримид 600	210
Авимид N	2400	LARC 13 эласт	390
Авимид КЗ	1900	PMR15+NR150	400
		АПИ-2	200
		АПИ-2+СКН-26А-1	350
		Эпоксиполиуретановые	5000-7500

Олигоимиды с ацетиленовыми группами

Therimid HR 600 (Hughes, США)
растворим в N-МП (50%) $T_g=275^{\circ}\text{C}$

РЕТИ-330, $T_g = 330^{\circ}\text{C}$ (NASA LARC)

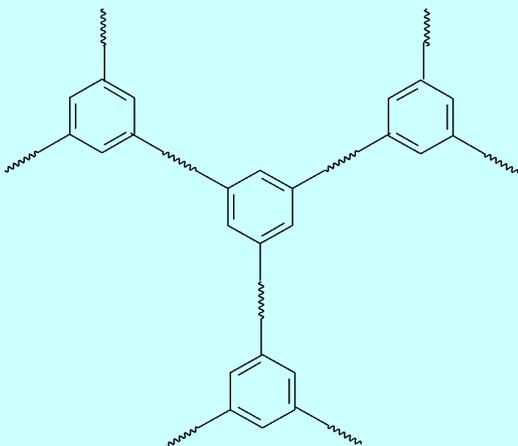
1000 час при 288°C , UBE



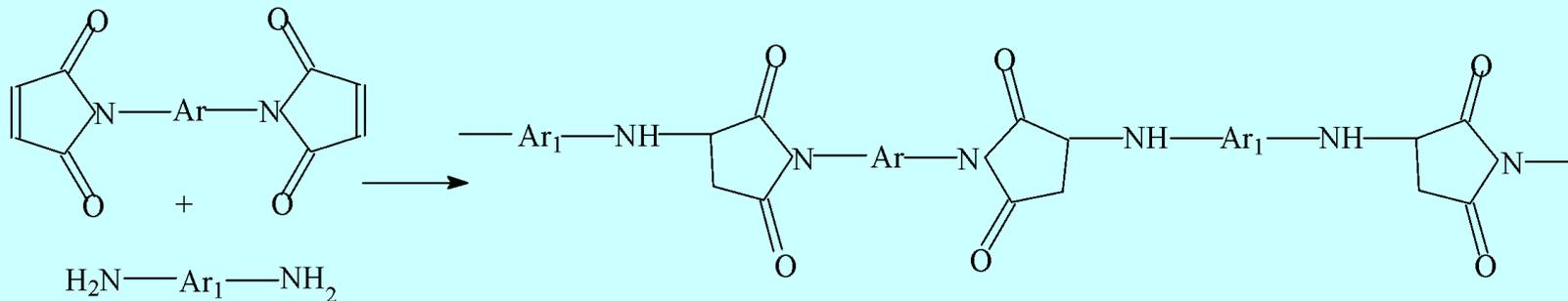
РЕТИ-365, нет свободного диаминa,

Повышенная трещиностойкость,

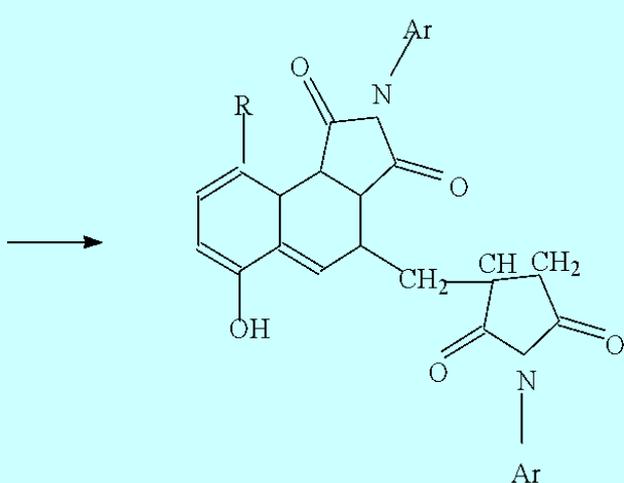
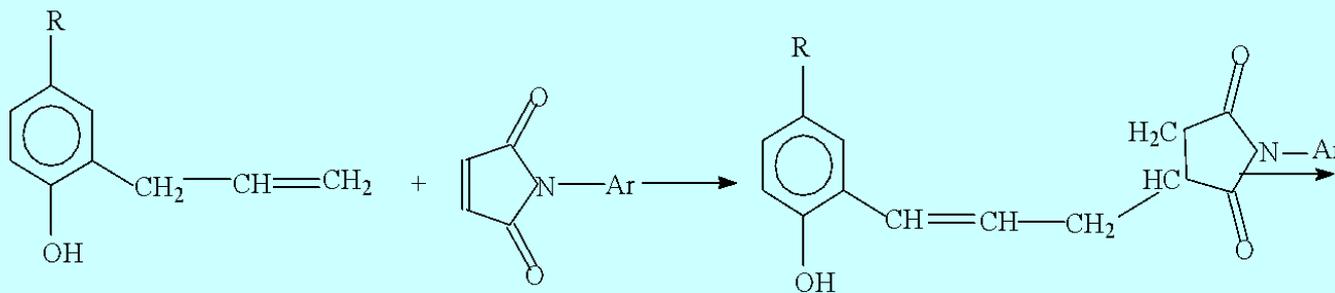
Без выделения летучих



Отверждение диаминами



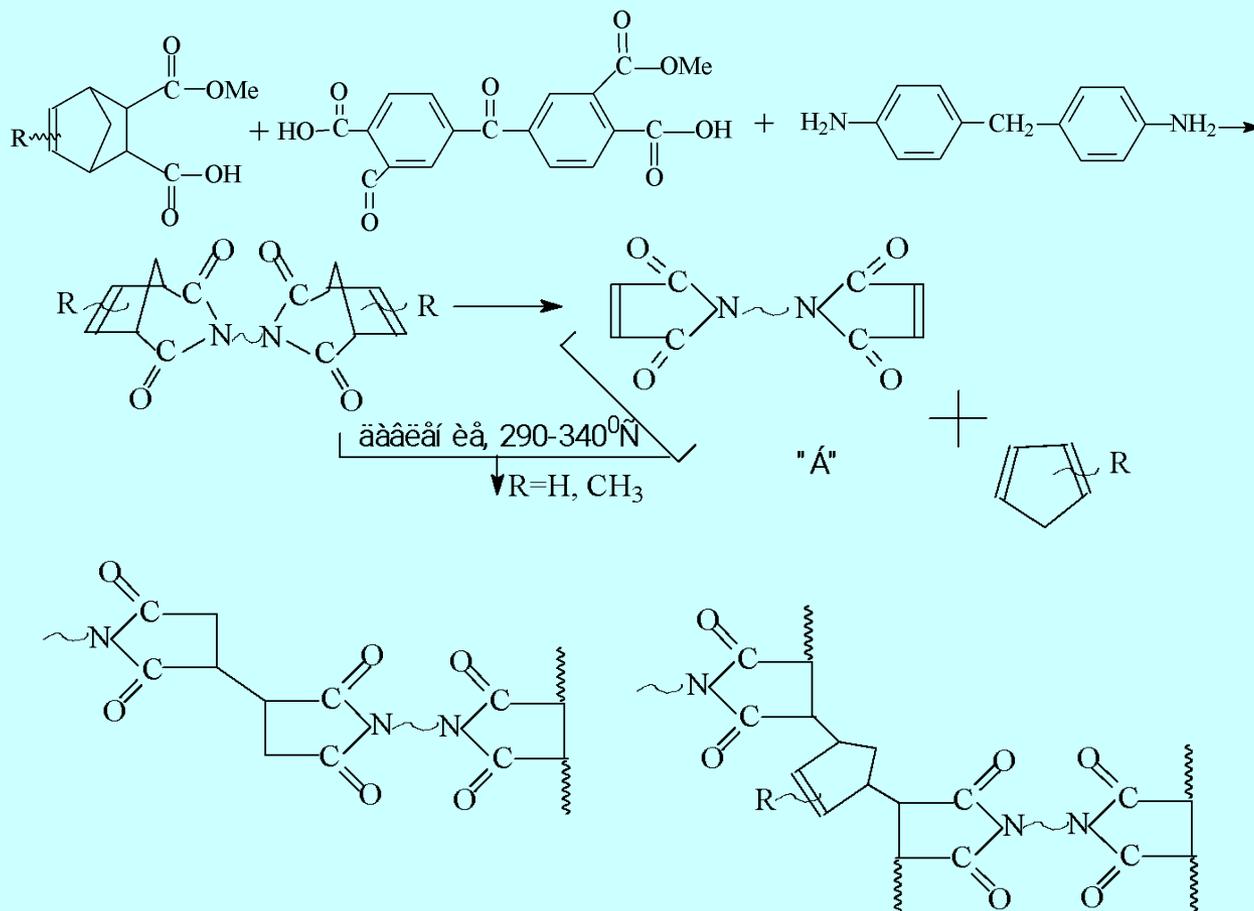
Отверждение аллильными соединениями



Направления исследований: композиции

- с функционализированными термопластами;
- с бис-циановыми эфирами;
- с ацетиленовыми соединениями;
- с бензциклобутановыми олигомерами

ПМР-смолы



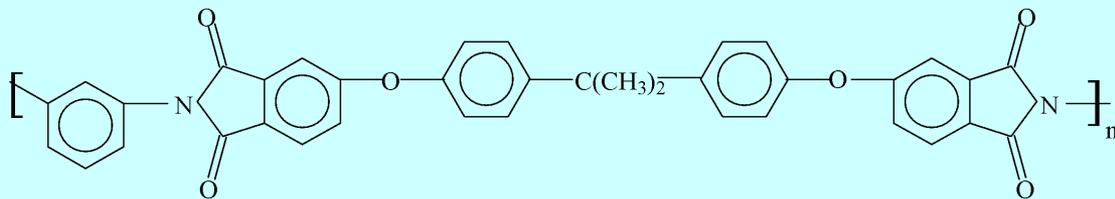
Недостаток: токсичность МДА.
 Новые типы ПМР-смол: RP-46 (LARC), DMZB-15 (GRC NASA)

$T_g = 315^{\circ}\text{C}$

NR-150 – фторсодержащие:

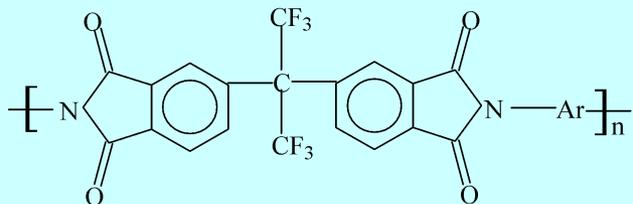
$T_g = 350^{\circ}\text{C}$

Термопластичные полиэфиримиды и полиимиды



Ultem-1000, $T_g = 215^{\circ}\text{C}$, Sabic Innovative Plastics

Extem $T_g = 311^{\circ}\text{C}$



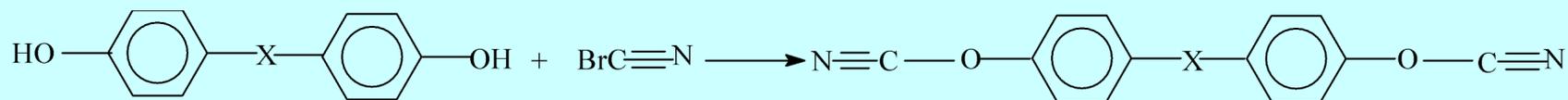
Avimid N (DuPont) $T_g = 311^{\circ}\text{C}$

Avimid K3B $T_g = 260^{\circ}\text{C}$

Огнестойкость, широкий температурный диапазон.

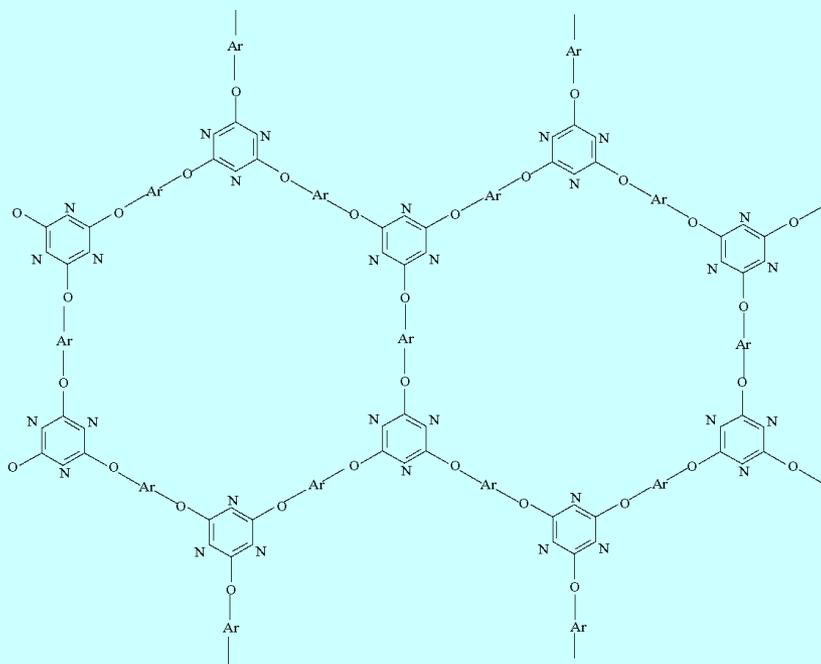
Применение: для авиационных деталей, электротехники

Бис-циановые эфиры



Григат, Пюттер, Berichte, 1964

Изоцианаты R-N=C=O Вюрц, 1849

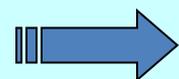
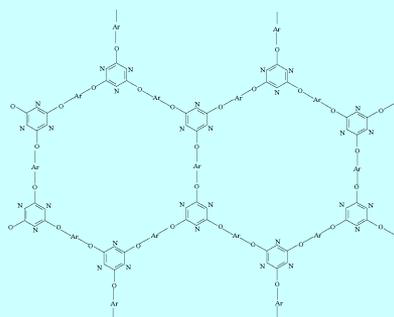
В.А.Панкратов, С.В.Виноградова, В.В.Коршак,
Успехи химии, 1977, т.4, №3, 530-564.

$T_g = 260-300^{\circ}\text{C}$, жесткость НВ 140 МПа,
прочность на изгиб 150-200 МПа, высокая
ударная прочность, низкое влагопоглощение,
 $T_{\text{деф}} = 360-410^{\circ}\text{C}$

2009: Cytec.

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Прочность при растяжении, МПа	Отн. удлинение	E, МПа
20	110	4.5	3.2
200	65	5.6	2.2
250	50	6.1	1.7

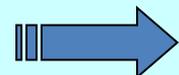
Основные свойства полициануратов (ПЦ)



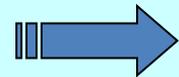
теплостойкость 200-250⁰С



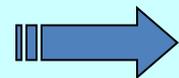
огнезащитенность: V-1, V-0 (UL-94)



низкое влагопоглощение (1-2%) ;



хорошие адгезионные свойства



низкая диэлектрическая проницаемость <3.0



радиационная стойкость >100 МГр



низкая вязкость, отсутствие летучих



однокомпонентность, удобство переработки



совместимость с другими смолами

Применение полициануратов в авиации и космической технике:



- теплостойкость;
- огнестойкость;
- стабильность размеров
- радиопрозрачность;
- устойчивость к излучениям 100 МГр



Спутники связи

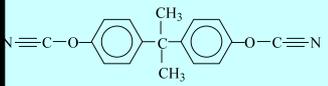
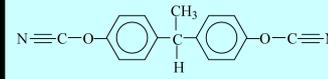
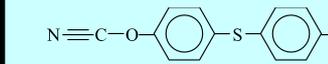
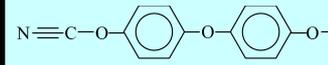
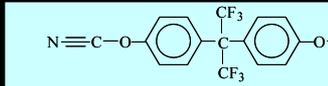
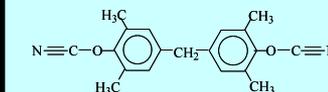
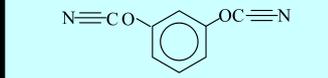
Антенны, радары

Фюзеляж летательных аппаратов и т.п.



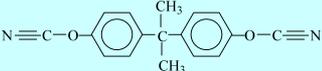
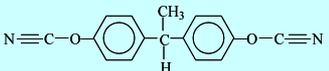
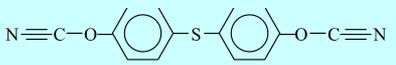
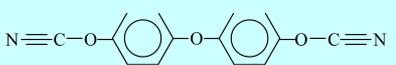
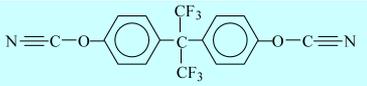
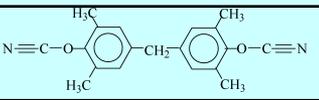
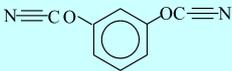
отражатели

Термические свойства полициануратов

Мономер	T _g , °C	СТЕ, ppm	TGA, °C	Кокс, %	UL-94, с
	289	64	411	41	56
	258	64	408	43	55
	273	68	400	46	4
	271	65	405	48	55
	270	54	431	52	<1
	252	71	403	48	34
	275	49	410	-	-

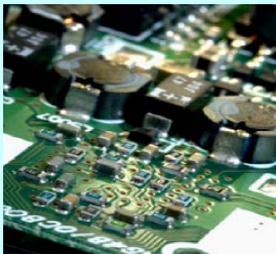
Прочностные свойства ПЦ при растяжении

(отверждение 250⁰С , катализатор нафтенат Zn/нонилфенол)

Мономер	Прочность, МПа	Модуль ГПа	Удлинение	G _{1c} Дж/м ²
	88	3.17	3.2	140
	87	2.19	3.8	190
	79	2.76	3.6	145
	111	3.35	5.4	215
	75	3.11	2.8	140
	73	2.97	2.5	175
	124	4.76	3.2	-

Применение полициануратов

Материалы для
электроники



Связующие для ПКМ

Многоуровневые
печатные платы

слоистые металл-
полимерные ПКМ

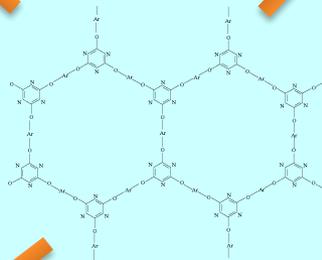
оптические элементы

Стекло- и
углепластики

защитные ЭМИ-экраны

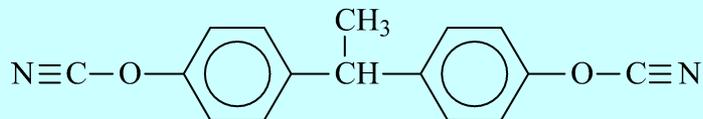
препреги

адгезивы



ТМА отвержденных образцов на основе БЦЭ II в режиме пенетрации штока в таблетку

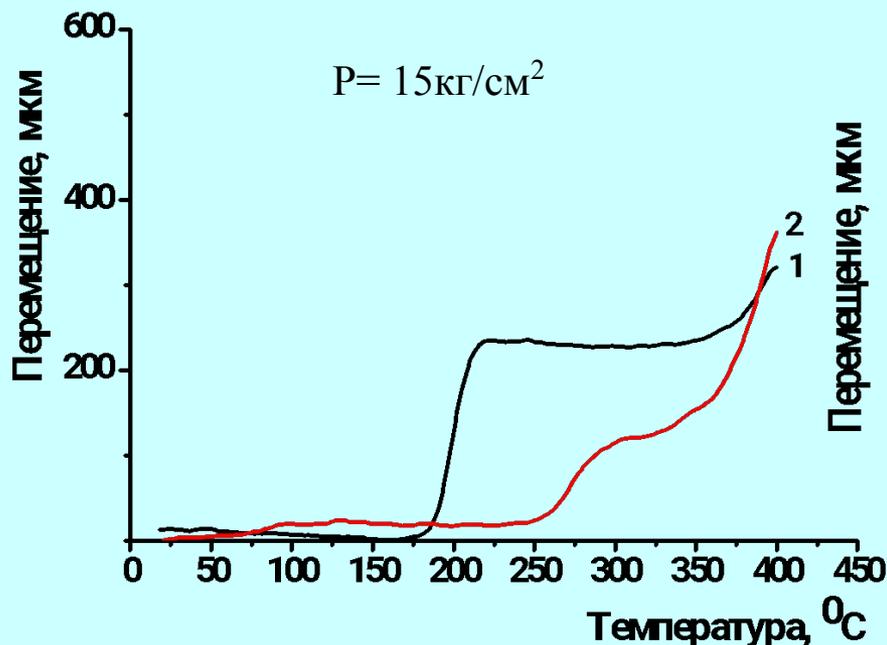
ИСПМ



$D=6\text{мм}, h=2\text{мм}, P=15\text{-}30\text{ кг/см}^2$

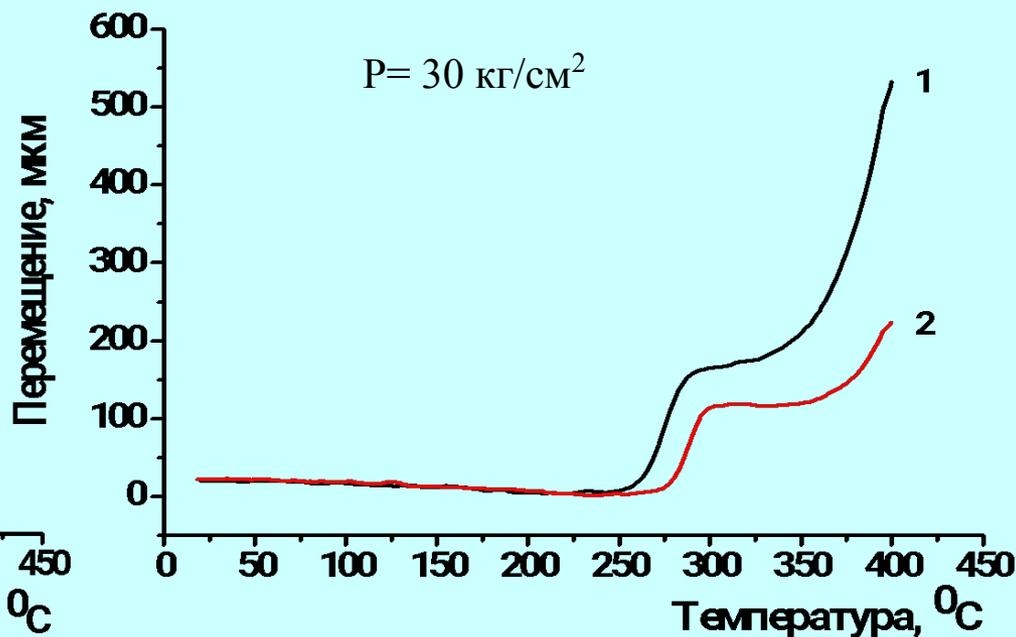
1- конверсия 80% (250⁰С, 45 мин)

2- конверсия 100% (250⁰С, 90 мин)

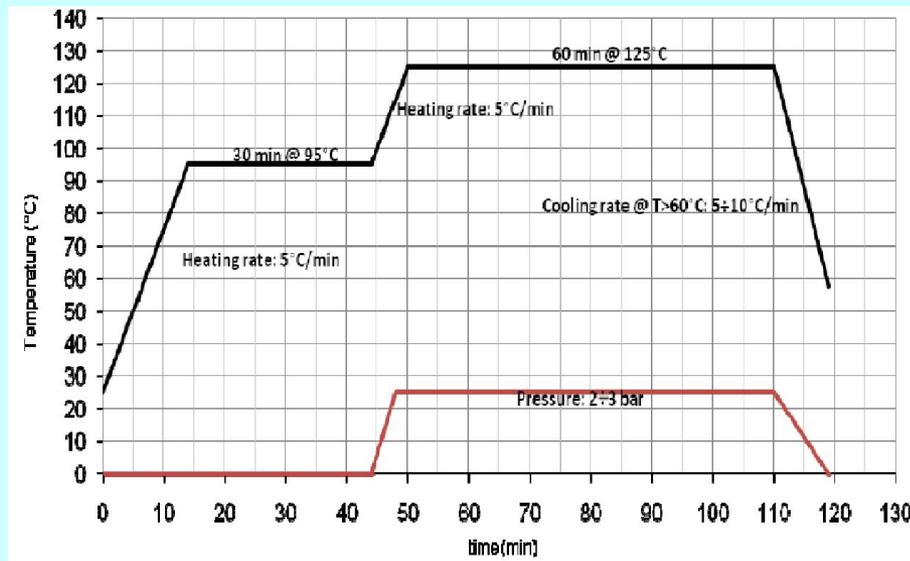
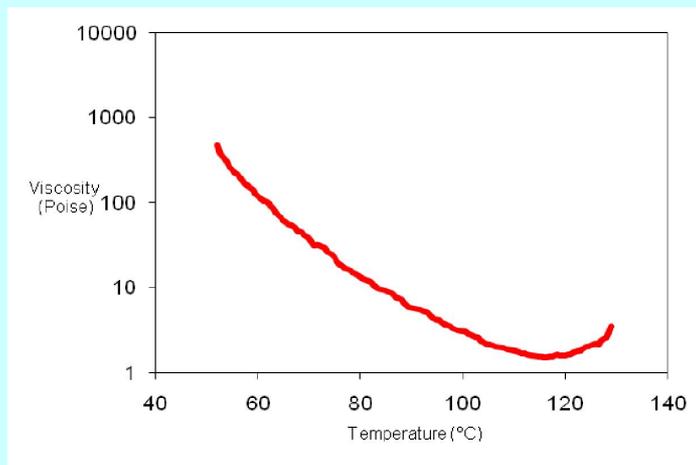


1- конверсия 100%

2- доп. отжиг (1 ч - 270⁰С, 1 ч - 300⁰С)



Кузнецов А.А. и др. Вопросы
материаловедения, 2012, 72, №4, с.185

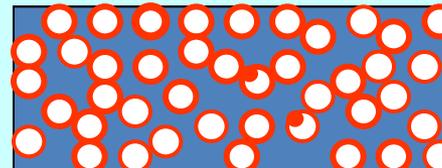
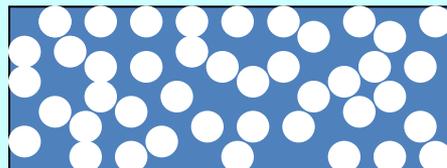
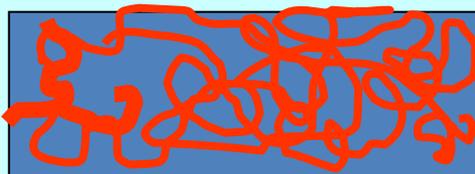
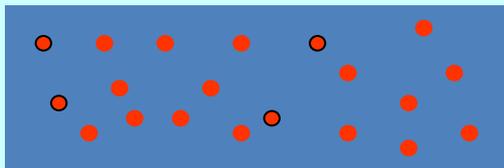


Пост-отверждение

Для достижения T_g ($\sim 410^\circ\text{C}$), 12 час 320°C +4 час 360°C +1 час 400°C
 Для $T_g = 220 \div 225^\circ\text{C}$ 4 час при 200°C .

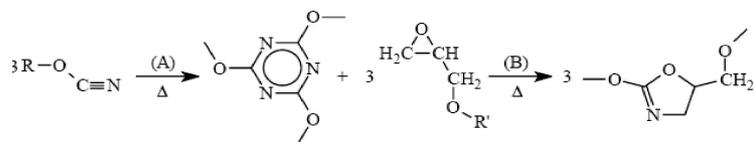
Новые перспективные типы ПКМ на основе ЦЭ

- ❑ химически связанные двухфазные композиции и ВПС с полиэпоксидами, полиуретанами, каучуками, инженерными пластиками (ударная прочность, трещиностойкость, снижение влагопоглощения, удешевление);
- ❑ наноккомпозиты, композиты с проводящими частицами;
- ❑ пористые материалы
- ❑ синтактные пены (композиты со стеклосферами $0,5 - 0,7 \text{ г/см}^3$);
- ❑ огнезащитные композиции.

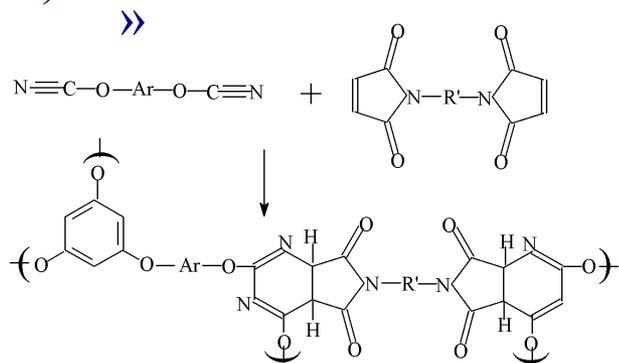


Химическое взаимодействие ЦЭ с функциональными группами разных типов приводит к прививке с образованием однофазных или двухфазных систем:

1) с эпоксидами

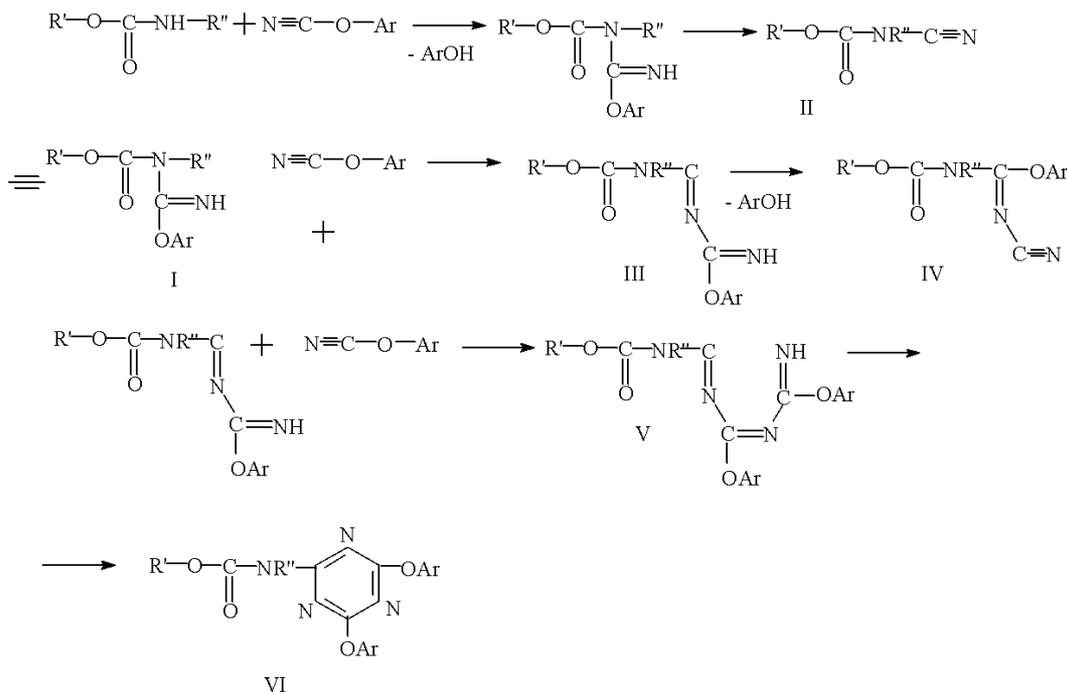


2) с бис-малеимидами (смолы «ВТ»)



3) с фенольными смолами

4) ВПС с полиуретанами



А.М.Файнлейб, ИХВС, 1990-2013

Тенденции развития рынка высокотемпературных полимеров

Объем производства высокотемпературных связующих и конструкционных полимеров: 400 000 т, рынок \$8 млрд; темпы роста 7-10%.

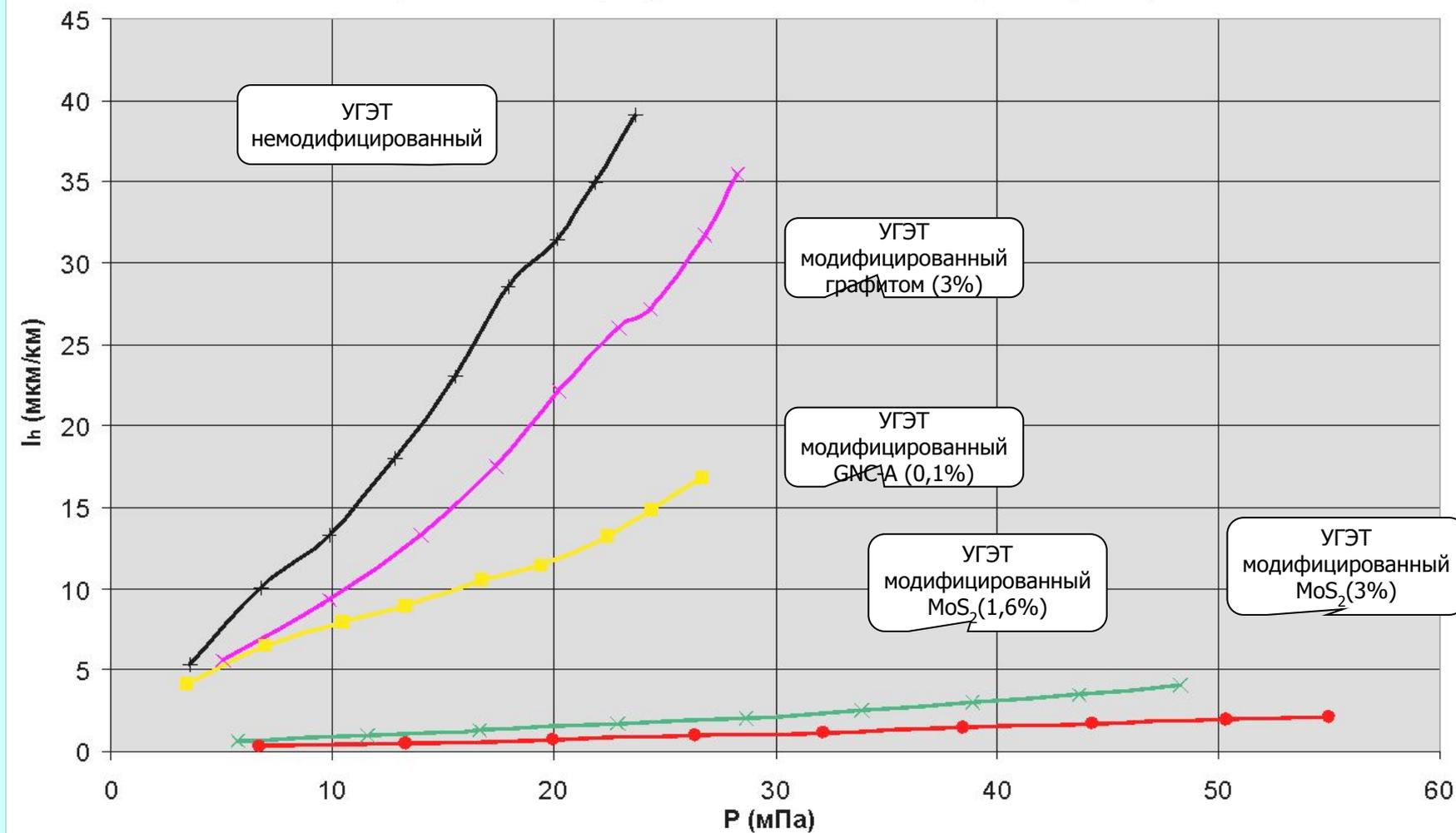
В России инженерные термопласты 45 т.т. (полиамиды 50%, поликарбонат 30%, ПБТ, наполненный ПП, термостойкие: <2%

Таблица. Свойства отвержденных ненаполненных связующих

Показатель	Эпоксидные смолы (ЭД-10, ЭД-20)*	ПЭИ Ultem-1000 *	Avimid на основе NR-150		Skybond 701, СП-97	PMR-15 ¹⁾	БМИ
			Avimid N	К-III			
Плотность, г/см ³	1,23-1,3	1,27	1,43	1,31	1,35	1,32	1,25-1,35
σ^* , МПа	75	105	110/117 ²⁾	102	70	48-56/187 ²⁾	40-80
E^+ , ГПа	2,6-3,6	3,0	14,2/4,5 ²⁾	3,76	4,2	3,95-4,5	4,2-4,9
ϵ , %	2,8-3,8	60	-	14,0	-	1,4	1,5-2,5
Пористость, % об.	до 5	<1	6	0,5	до 20	0,5-2	1,0-2,5
G_{1c} , Дж/м ²	<u>130-150</u>	1000-1900	<u>2400-2550</u>	1900/10 ³⁾	400	230-280 (эластиф. до 400)	34-260 (эластиф. до 1000)
Водопоглощение, % (вода, 70 ⁰ С, 2 нед.)	1,8 ⁴⁾	0,25 ⁵⁾	1,0	1,0	5	1,6	1,5-5,0
Tg, ⁰ С, сухие, влажные	100-120 -	220 -	340-310 230	250 205	330-350 250-280	330-370 280	220-350 180-200

Совместно с ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» разработана рецептура и методология получения модифицированного MoS_2 теплостойкого связующего для ПКМ антифрикционного назначения типа УГЭТ. Разработанное связующее характеризуется исключительно высокой устойчивостью к износу.

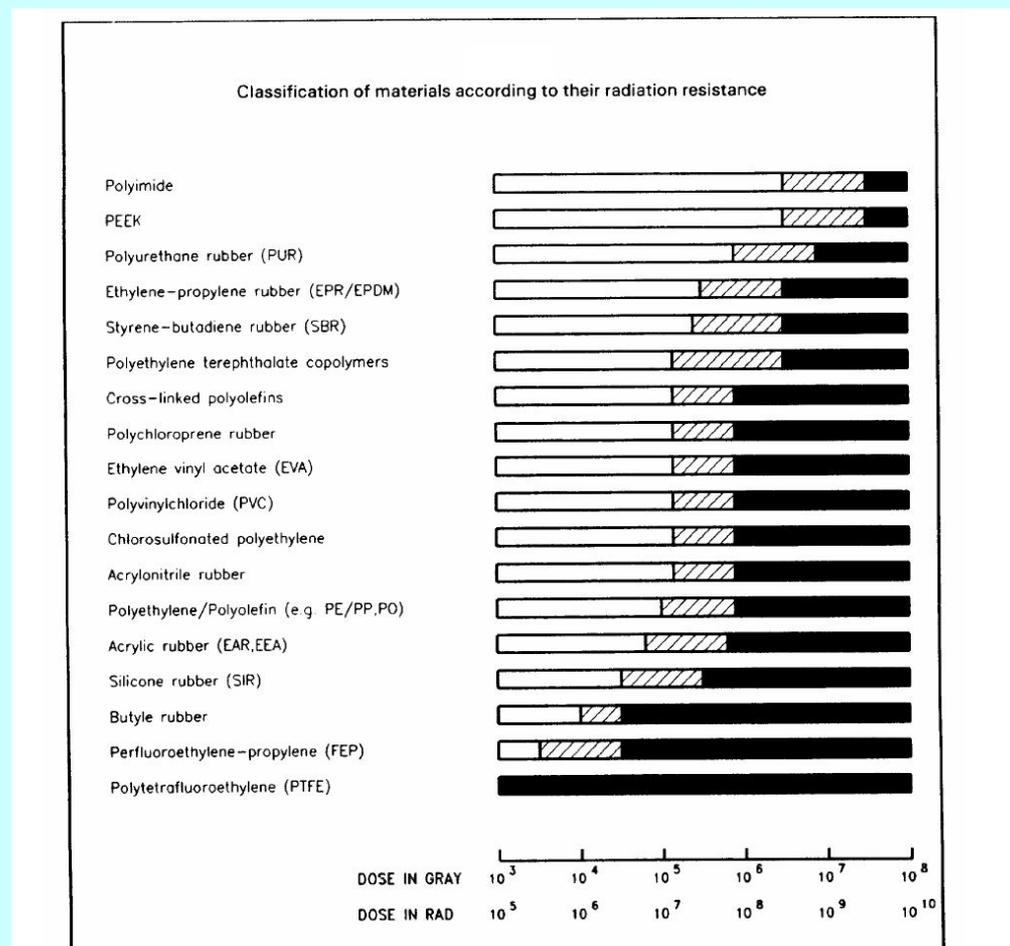
Зависимость линейной интенсивности изнашивания углепластиков от давления в трибоконтакте при трении по стали 14Х17Н2 ($V=1\text{м/с}$; вода)



Требования к полимерным материалам, работающим в открытом космосе

Радиационная стойкость полимеров

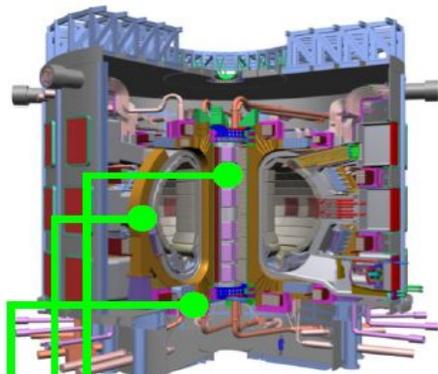
- Радиационная стойкость;
- Стойкость к УФ-излучению;
- Криогеностойкость (мех.св-ва);
- Диэлектрические свойства;
- Радиопрозрачность;
- Способность изготовления ; изделия нужной формы;



Комбинированные радиационнстойкие криогенностойкие полимерные композиционные материалы в сверхпроводящих кабелях

Selection of organic materials used as electrical insulator for ITER superconducting coil

■ Fabrication of electrical insulator for ITER superconducting coil

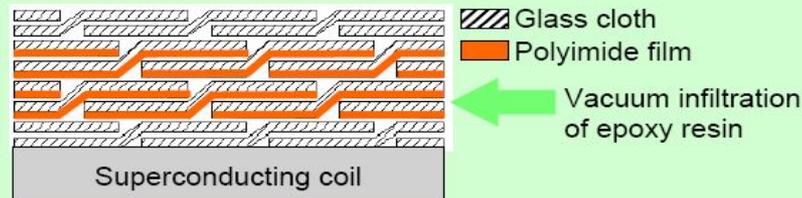


Central Solenoid (CS) Coil
for Ignition of Plasma

Toroidal Field (TF) Coil
for Confining of Plasma

Poloidal Field (PF) Coil
for Adjustment of Position
and Shape of Plasma

Glass cloth/Polyimide/Epoxy resin



● Required properties for epoxy resin

- Viscosity : 200mPa·s at 60°C
- Pot life time : 40h (time to increase the viscosity)
- Radiation resistance : 10MGy



● Candidates

- Epoxy resin (DGEBF) + Cyanate ester (CE)
- Epoxy resin (DGEBF) + Epoxy resin (TGDDM)

Радиационная стойкость полиимидной пленки Kapton

Table 12
Effect of Gamma Radiation Exposure on Kapton® Polyimide Film
(Cobalt 60 Source, Oak Ridge)

Property	Control 1 mil Film	10 ⁴ Gy 1 h	10 ⁵ Gy 10 h	10 ⁶ Gy 4 d	10 ⁷ Gy 42 d
Tensile Strength, MPa psi × 10 ³	207 (30)	207 (30)	214 (31)	214 (31)	152 (22)
Elongation, %	80	78	78	79	42
Tensile Modulus, MPa (psi × 10 ³)	3172 (460)	3275 (475)	3378 (490)	3275 (475)	2903 (421)
Volume Resistivity Ω-cm × 10 ¹³ at 200°C (392°F)	4.8	6.6	5.2	1.7	1.6
Dielectric Constant 1 kHz at 23°C (73°F)	3.46	3.54	3.63	3.71	3.50
Dissipation Factor 1 kHz at 23°C (73°F)	0.0020	0.0023	0.0024	0.0037	0.0029
Dielectric Strength V/μm (kV/mm)	256	223	218	221	254

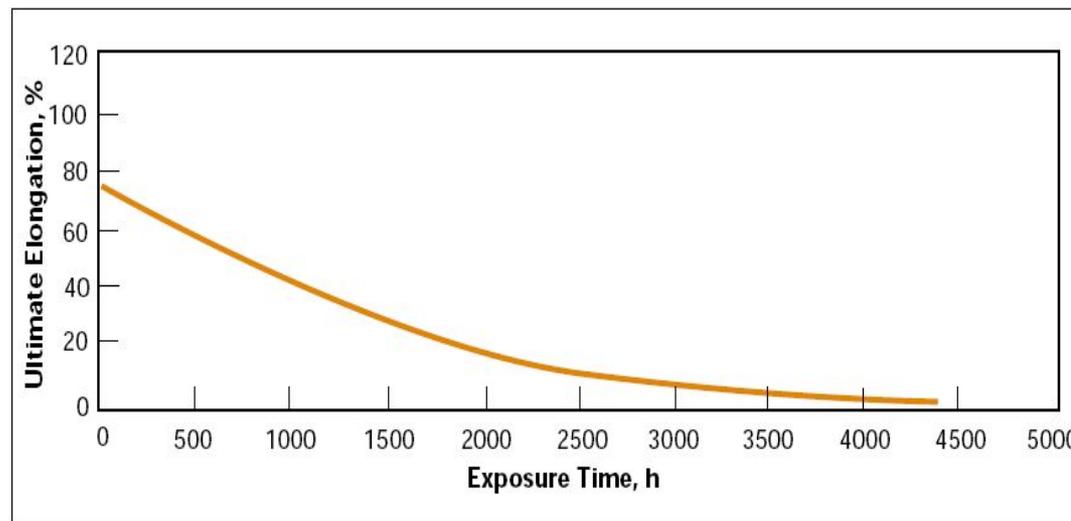
Устойчивость полиимидной пленки Kapton к УФ-облучению

Table 14
Effect of Ultraviolet Exposure on Kapton® Polyimide Film*

	1000 h Exposure
Tensile Strength, % of Initial Value Retained	100
Elongation, % of Initial Value Retained	74

*Vacuum environment, 2×10^{-6} mmHg at 50°C (122°F). UV intensity equal to space sunlight to 2500Å.

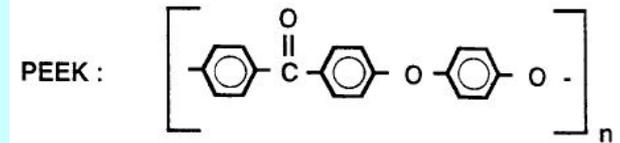
Figure 23. Effect of Florida Aging on Kapton® Polyimide Film



Полиэфирэфиркетон PEEK

Термо- и радиационностойкий термопластичный материал

Construction	Multi strand wire, extruded PEEK insulation
Conductor	Silver plated copper, multi strand 0.35mm: 7 x 0.12mm \varnothing
Insulation	PEEK, unfilled, natural colour
O.D \varnothing	0.68 \pm 0.02mm
Min. Bend radius	7.5 x diameter (long term)
Radiation Resistance	10 ⁹ Rad = 10 ⁷ Gy
Voltage Rating	At least 4KV DC in vacuum
Working voltage	>10KV DC
Breakdown voltage	>20KV
Vacuum	UHV, 10 ⁻¹⁰ mbar and better
Temperature	-65°C...250°C, -200°C for non-flex applications
Insulation resistance	>1 x 10 ¹⁶ Ohm cm



PEEK insulated wire, 311-PEEKM-035-10M

Изменение механических свойств ПКМ фирмы ERTA на основе PEEK, РА46 и PEI при радиоллизе Co(60)

TIS No	Trade name	Dose (MGy)	Strength (MPa)	Deformation (%) at break	prop.	Modulus (GPa)
520	Erta PEEK	0.0	177	> 15	2.4	4.3
		5.0	179	> 15	2.9	4.1
		7.0*	187	> 15	1.6	3.0
		10.	161	11.6	2.7	4.2
		50.	111	3.8	1.5	4.3
		100.	143	5.8	1.9	4.2
	RI		> 8.0	7.0		
526	Ertalon 4.6	0.0	126	3.7	1.2	5.8
		3.0	133	3.4	1.6	5.9
		7.0*	50	1.2	1.0	3.0
		10.	64	1.4	1.5	3.7
		50.	33	1.5	1.0	1.9
	RI		7.0	6.8		
533	Erta PEI	0.0	171	> 15	2.1	3.1
		1.0	174	> 15	2.0	3.2
		3.0	179	> 15	2.1	3.3
		10.0	158	10.9	1.2	3.2
		50.0	102	3.3	2.2	3.3
	RI		> 7.7	7.0		

CERN, workshop on advanced materials, 1994

Заключение:

В мире к 2007:

- Высокотемпературные связующие и конструкционные полимеры: одно из наиболее быстро развивающихся областей прикладной химии: прирост рынка 7-10%;
- освоено или находится в процессе освоения промышленное производство связующих и ПКМ на их основе с длительной температурой эксплуатации 250-330⁰С
- перспективные термоотверждаемые связующие: новые ПМР-смолы, олигоимиды с ацетиленовыми группами, бис-циановые эфиры, бензоксазины, фталонитрильные смолы;
- перспективные термопластичные связующие и матрицы для ПКМ– полифениленсульфид, полиэфиримиды, полиимиды, полиэфиркетоны, полиэфирсульфоны, ЖК-полиэфиры;
- значительные успехи в технологии формования дают импульс для развития ПКМ, особенно на термопластичных связующих.

В России: производство термостойких термопластов отсутствует (исключение: полисульфон: пилотная установка в НИИПМ);

термостойкие термоотверждаемые ПИ: СП-97, АПИ-3: БМИ: ПАИС-1: опытные партии.

Имеются хорошие научные разработки в области синтеза высоко-температурных полимерных связующих для ПКМ:

- Полиимидные термопласты: ИСПМ РАН, ИВС РАН, ИНЭОС РАН, мономеры: ЯрГТУ.
- Полиимидные пресс-порошки: ООО «Суперпласт», ИСПМ РАН
- Полиэфиркетоны: ИНЭОС РАН
- ЖКП –НПО Химволокно, ИВС
- Полисульфоны: НИИПМ
- Имидообразующие термоотверждаемые составы: ИВС РАН, НИИПМ, МГУ (кафедра хим. технологии),
- Бис-малеимиды: «Технология» (Обнинск)
- Циановые эфиры: ИНЭОС РАН

Необходима системная техническая политика в области создания производства термостойких связующих и матриц для ПКМ

Спасибо за внимание