



новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии



# Методы определения механических свойств полимерных композиционных материалов

Москва 2014



новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
И НАНОТЕХНОЛОГИИ

# Материалы



## Армирующие материалы

- мультиаксиальные ткани;
- комбинированные ткани;
  - гибридные ткани;
    - ровинги;
  - сетки, вуали;
    - маты;

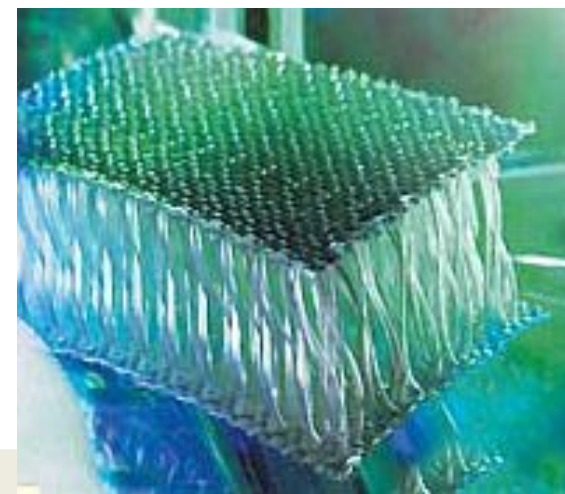
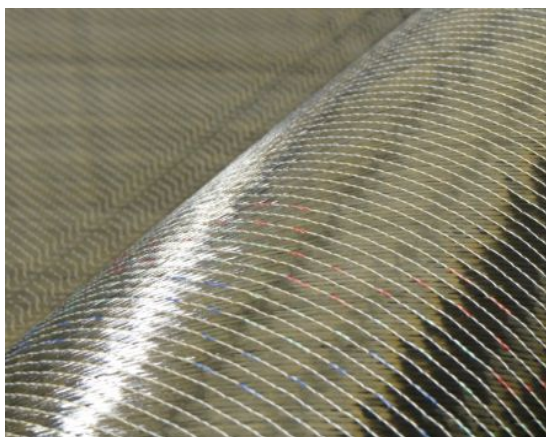


## Связующие

- полиэфирные;
- винилэфирные;
- эпоксидные;

## Наполнители

- бальзовая древесина;
  - пенопласты;
    - маты;
    - соты;





новые материалы  
композиты  
и нанотехнологии

# Проблемы исследования

ИННОВАЦИОННЫЙ  
ПРОЕКТ

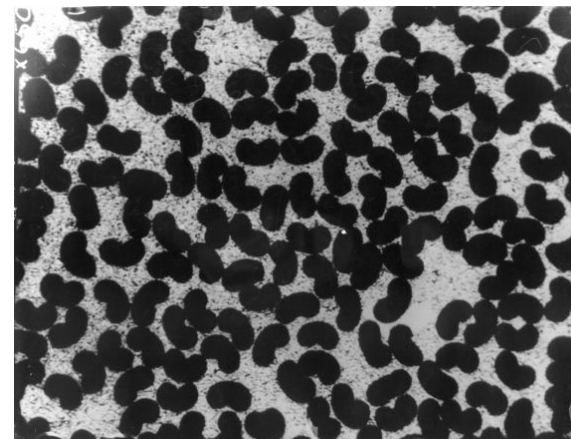


КОМПОЗИТЫ  
РОССИИ

- **Волокна** - являются материалами с высокой прочностью и жесткостью, но не образуют конструкцию. Толщина углеродного волокна 4-7 мкм, толщина мононити в УВ 7-12 мкм.
- **Матрицы** – служат для объединения волокон в конструкцию. Толщина слоя связующего 1-1000 мкм.
- **Композиты** – результат объединения волокон, матрицы и схемы армирования, обычно создается вместе с конструкцией.

## Основные проблемы

- Анизотропия свойств материала
- Ограниченный температурный диапазон
- Низкая твердость поверхности
- Наличие пор в материале
- Привязка материала к технологии и к изделию
- Часто, уникальность изделий и высокая стоимость испытаний





новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии

# Характеристики КОМПОЗИТОВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ



- Доля армирующего наполнителя по массе и по объему
- **Прочность в разных направлениях**
- **Жесткость (модули упругости) в разных направлениях**
- Коэффициент линейного теплового расширения в разных направлениях
- **Ударная вязкость**
- **Трещиностойкость (вязкость разрушения)**
- Стойкость к внешним воздействиям( радиация, влага, растворители)
- Специальные свойства (теплопроводность, электропроводность, коэффициент трения)
- **Температура стеклования связующего**
- Реологические свойства
- Степень отверждения

# Виды испытаний



новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии

- Статические
- Динамические (циклические)
- Температурные
- Климатические

## Стандартные испытания

- Растяжение
- Сжатие
- Сдвиг
- Изгиб
- Трещиностойкость

## Особые испытания

- Кольцевые образцы
- Специальные виды испытаний – натуральных образцов, изделий



Испытания на растяжение



Испытания на сжатие



Испытания на изгиб



Приспособление для определения междуслойной прочности при сдвиге, ILSS



Сдвиг соединений внахлест/вдоль слоев



Испытания образцов с V-образным надрезом на сдвиг



Испытание Compression After Impact



Вязкость разрушения



Испытание на усталость

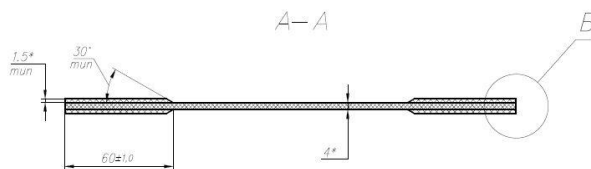
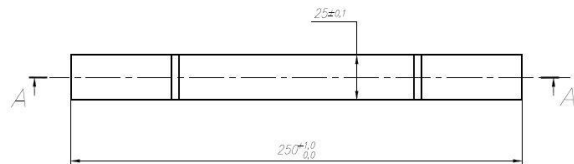
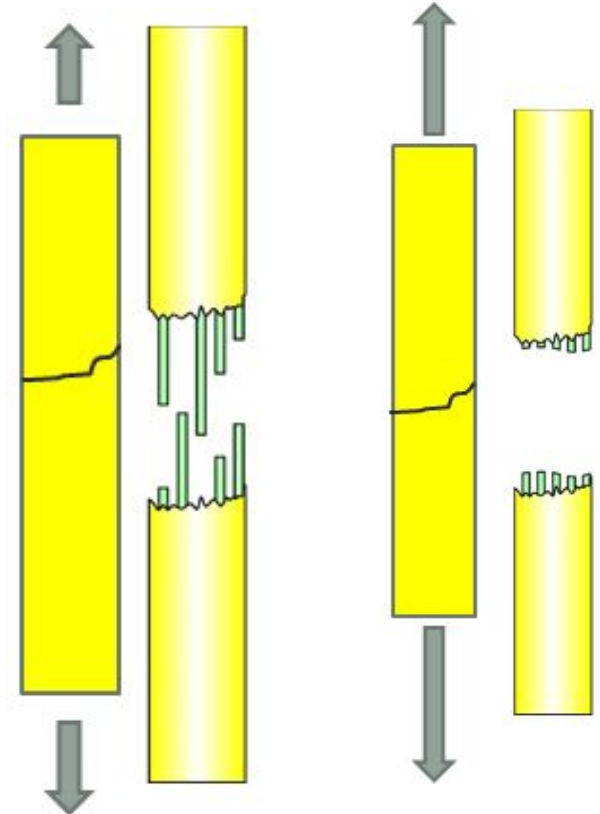


новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии

# Растяжение композита, полимера, волокна



$\sigma^+$



Проблемы:  
Образец может выскользнуть из захватах  
Образец может разрушиться в захватах



новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии

# Растяжение волокна, полимера, КОМПОЗИТА

ИННОВАЦИОННЫЙ  
ПРОЕКТ

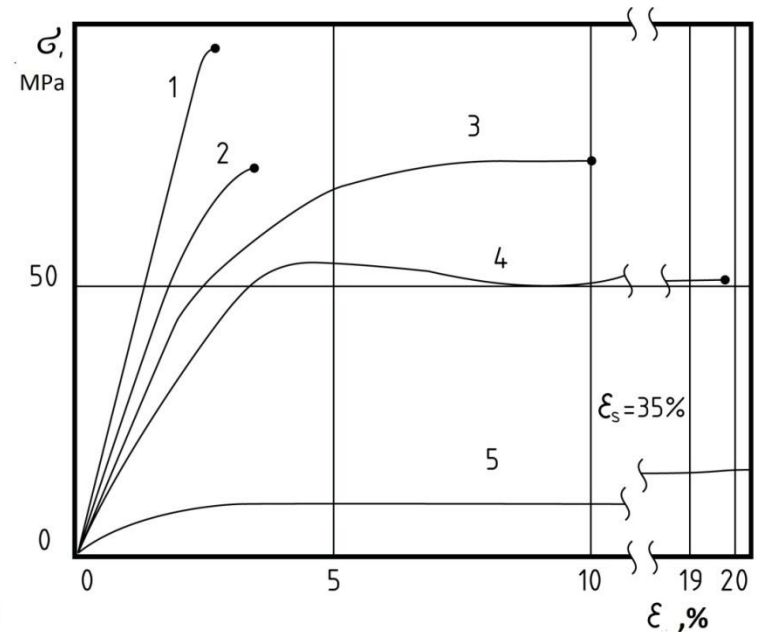
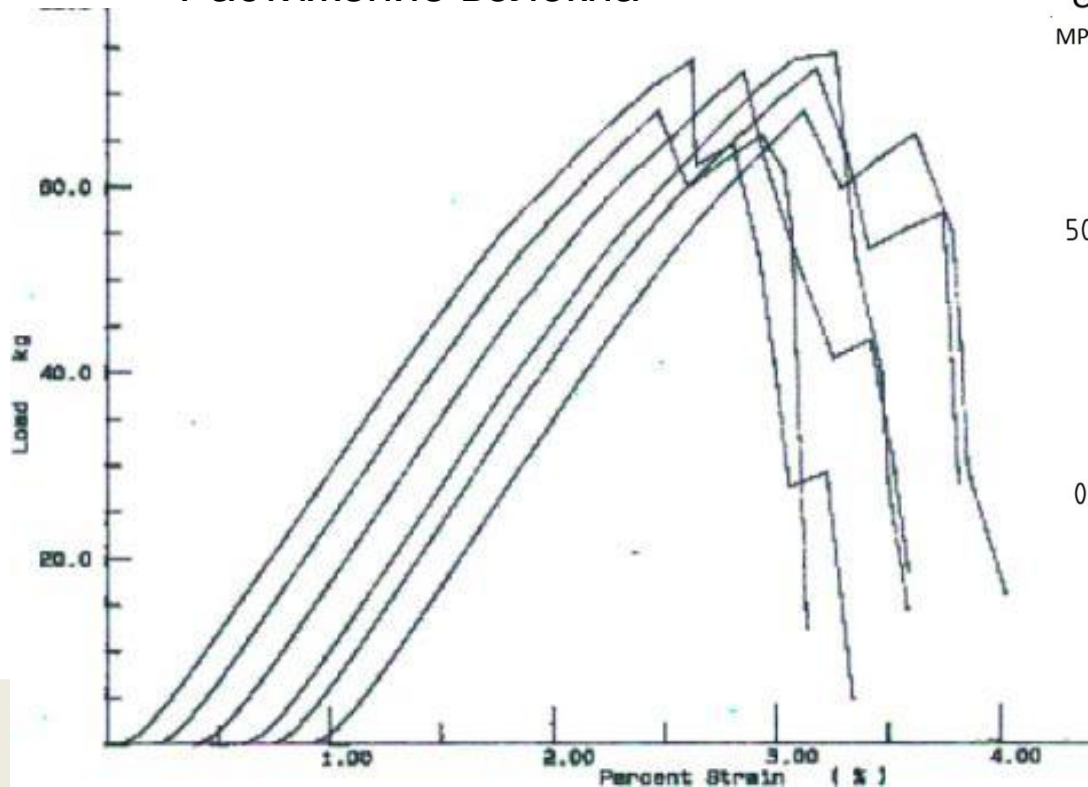


КОМПОЗИТЫ  
РОССИИ

Растяжение полимера:

1 – эпоксидный; 2 – эпокси-  
фенольный; 3,4 – полиуретан; 5 –  
СИЛИКОН

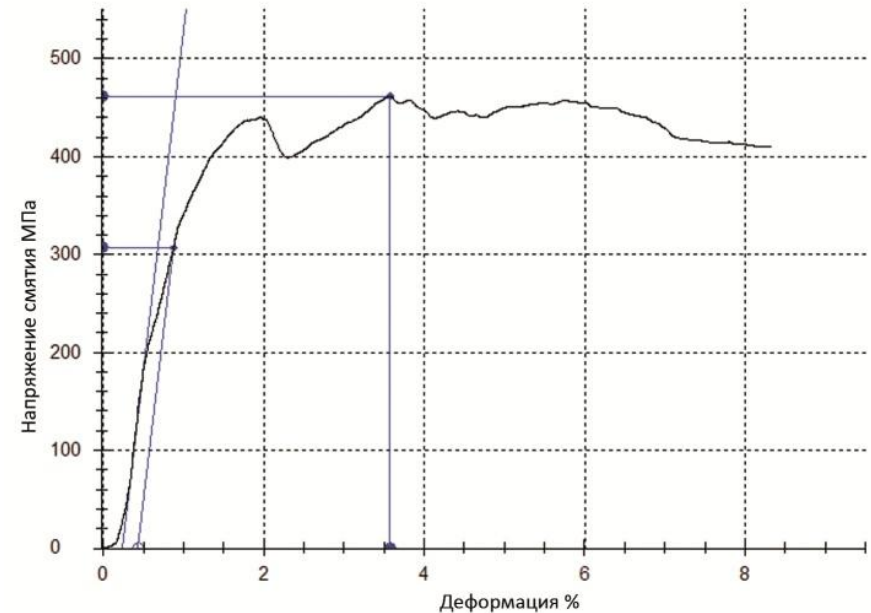
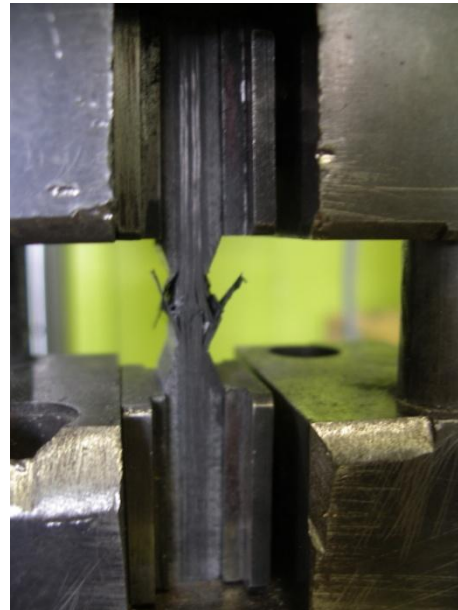
Растяжение волокна





новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
И НАНОТЕХНОЛОГИИ

# Сжатие композита, полимера



Проблемы:

Потеря устойчивости образца

Разрушение торцов

Сложно мерить предельную деформацию

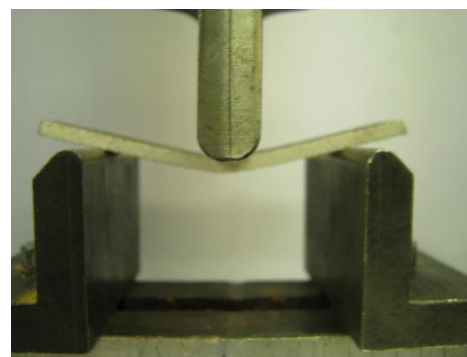
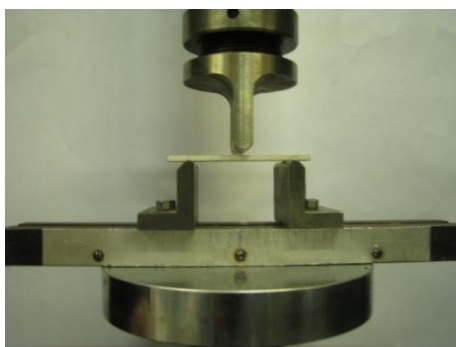
$\sigma^-$



# Изгиб композита, полимера



новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии



Отвердитель	Разрушающее напряжение, МПа при			Температура стеклования °С, $T_g$
	изгибе	сжатии	растяжении	
ДЭТА	111	102	72	63
ТЭТА	139	122	109	58
ГМДА	122	118	78	57
ПЭПА	105	92	50	58
ТЭА	110	115	71	67

# Прочность при межслоевом сдвиге



новые материалы  
композиты  
и нанотехнологии

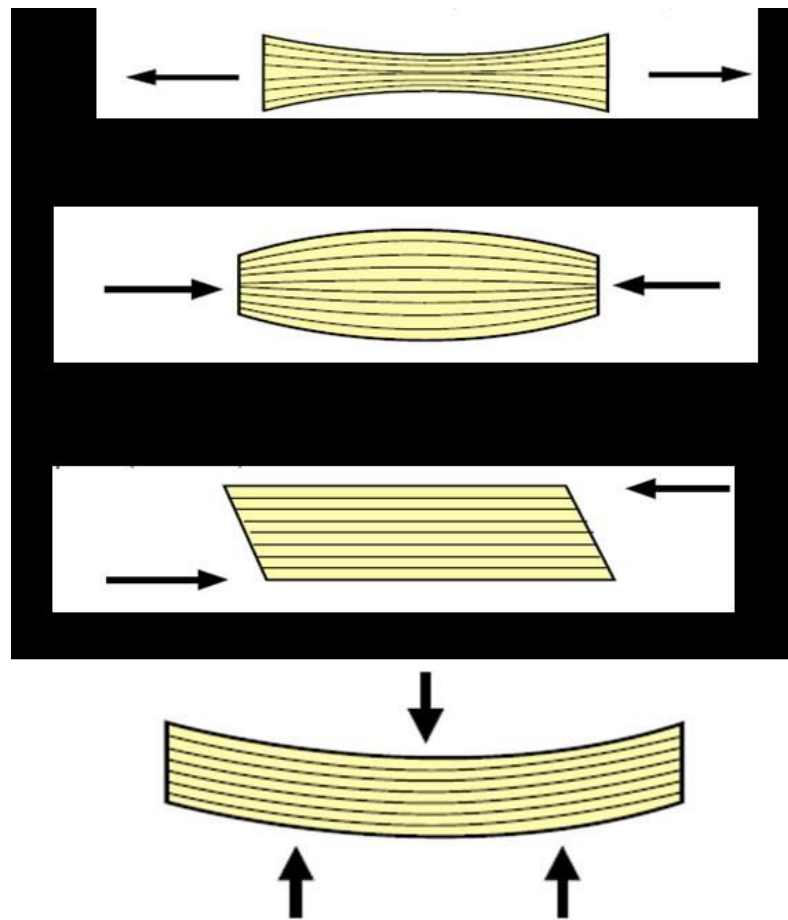


Растяже  
ние

Сжатие

Межслой  
ный сдвиг

Изгиб



# Изгиб, сжатие, растяжение для изотропного композита



новые материалы  
композиты  
и нанотехнологии

ИННОВАЦИОННЫЙ  
ПРОЕКТ



КОМПОЗИТЫ  
РОССИИ

Свойства	Показатель
Предел прочности, МПа: - при сжатии - при растяжении - при изгибе	160 75 69
Предел прочности после термостарения в течение 100 циклов при температурах -60 + 100, МПа - при сжатии - при растяжении - при изгибе	150 68 66
Предел прочности после циклических нагрузок (50% от разрушающей), 100 циклов, МПа - при сжатии - при растяжении - при изгибе	145 70 62

Состав анизотропного композита: эпоксидное связующее, наполнитель – алюминиевая пудра



новые материалы  
композиты  
и нанотехнологии

# Изгиб, сжатие, растяжение, модуль (углепластики)

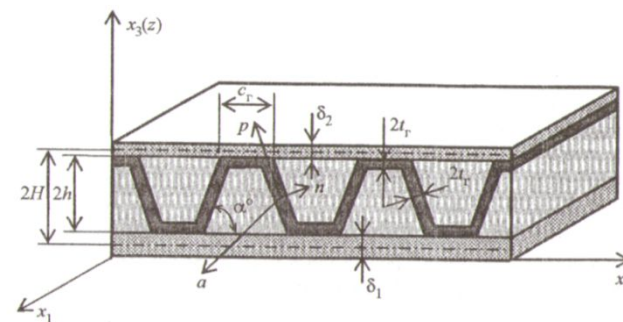
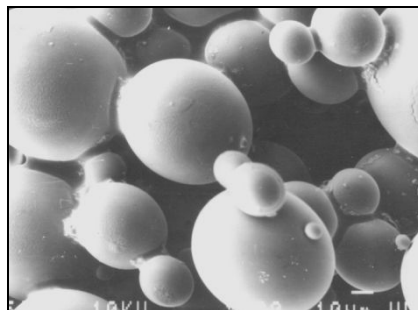


Для металлов предел выносливости составляет 0,2-0,3 от кратковременной прочности. Для углепластиков (высокомодульных) **предел выносливости достигает 0,5-0,7.**

По параметрам **удельная прочность** углепластики в 2-4 раза превосходят металлы.

Материалы	$\sigma^+$ , МПа	$\sigma^-$ , МПа	E, ГПа	$\gamma$ кг/см <sup>3</sup>	$E/\gamma$	$\sigma/\gamma$
Углепластик (анизотропная структура)	1700	1400	145	1600	90,6	1062
Углепластик (изотропная структура)	550	520	51	1570	34	350
Al сплав (АК4-1)	450	450	72	2700	27	170
Ti сплав (BT-8)	1100	1000	120	4500	26	220

# Сжатие, сдвиг, модуль (сотовые заполнители)



Тип сотового заполнителя	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при сдвиге, МПа	Модуль упругости при сдвиге, МПа
Полимерные соты	25-150	0,4-13	0,3-3,2	20-200
Стеклопластиковые соты	50-110	1,5-5	0,8-3,5	50-200
Алюминиевые соты	25-70	0,5-3	0,3-1,8	60-290

Примечания: Показателей прочности и модуля упругости при сдвиге определены для образцов, плоскость склейки которых, параллельна и перпендикулярна

# Прочность волокна и углепластика

Марки углеродных тканей	Прочность углеродного волокна при растяжении, МПа	Прочность углепластика при, МПа	
		Межслойном сдвиге	Растяжении
T-700	4500	65	2050
HTS-45	4000	35	1780
T-300	3500	30	1400
ЛУП	2500	55	1110
Элур	2400	80	1020
УОЛ-300	2200	40	1250

Содержание волокнистого наполнителя 0,5

Связующее – эпокси-фенольное

Технология получения углепластиков – прессование

# Ударная вязкость композита, полимера



новые материалы  
композиты  
и нанотехнологии



Сопротивление полимерных связующих ударным нагрузкам называется **ударной вязкостью  $a$**  (кДж/м<sup>2</sup>)

$$a = \frac{W}{S_0} \quad 2 < a < 40$$

$$W = mgl(\cos \beta - \cos \alpha)$$



$W$  – работа, необходимая для разрушения образца;  
 $S_0$  – площадь поперечного сечения, измеренная в плоскости симметрии надреза;  
 $m$  – масса маятника;  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $l$  – длина маятника.  
 $\alpha, \beta$  – углы на которых находится маятник до и после удара

Доступны два номинала копров Pellini: 550 Дж и 1650 Дж.  
Максимальная высота сброса составляет 1 метр или 1,3 метра.  
Согласно стандарту (ASTM E208 и SEP 1325)  
регламентированные значения энергии удара достигаются посредством простого приложения грузов.

# Ударная вязкость полимеров



новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии

ИННОВАЦИОННЫЙ  
ПРОЕКТ



КОМПОЗИТЫ  
РОССИИ

Количество термопластика, %	Тип термопластика			
	Полисульфон	Полиэфиримид	Полисульфон	Полисульфон
	Изгиб , МПа		Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	
0	25		14	
5	30	33	17	-
10	42	43	23	24
20	50	52	33	34
30	53	57	38	43
	Относительное удлинение, %		Адгезионная прочность, МПа	
0	0,2		48	
5	1,2	-	46	43
10	1,5	-	44	39
20	1,9	-	41	37
30	2,2	-	36	31





новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии

# Ударная вязкость сферопластиков,

## на основе эпоксидного связующего

ИННОВАЦИОННЫЙ  
ПРОЕКТ



КОМПОЗИТЫ  
РОССИИ

Показатель	ВПЗ-1	ВПЗ-7	ВПЗ-9
Марка			
Жизнеспособность при $18 \pm 3^\circ\text{C}$ , ч	40-60 мин	2-3	1,5-2
Плотность, $\text{г/м}^3$	600-800	700	600-620
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа, не менее	30	40	35
Ударная вязкость, $\text{кДж/м}^2$	0,5-0,7	3,0	1,0-1,5



новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии

# Трещиностойкость

ИННОВАЦИОННЫЙ  
ПРОЕКТ



КОМПОЗИТЫ  
РОССИИ

Некоторые свойства материалов почти не зависят от их микроструктуры, например, плотность, модуль упругости, коэффициент теплового расширения и теплоемкость. Это так называемые **структурно-независимые** свойства. К **структурно-зависимым** свойствам относятся: предел текучести, предел прочности, деформация при разрыве, **вязкость разрушения  $G_{1c}$** , предел ползучести и предел усталости.

Типичные значения вязкости разрушения терморезистивных полимеров составляют 200–600 Дж/м<sup>2</sup>. Для термопластичных полимеров и металлов эта величина на порядок выше.



# Трещиностойкость

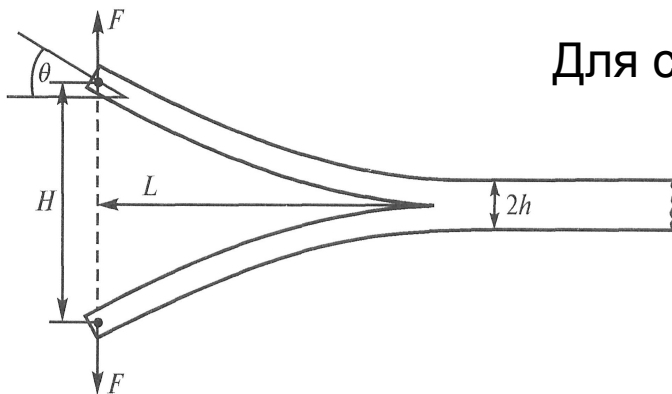


новые матери-  
компози-  
и нанотехноло-

ИННОВАЦИОННЫЙ  
ПРОЕКТ



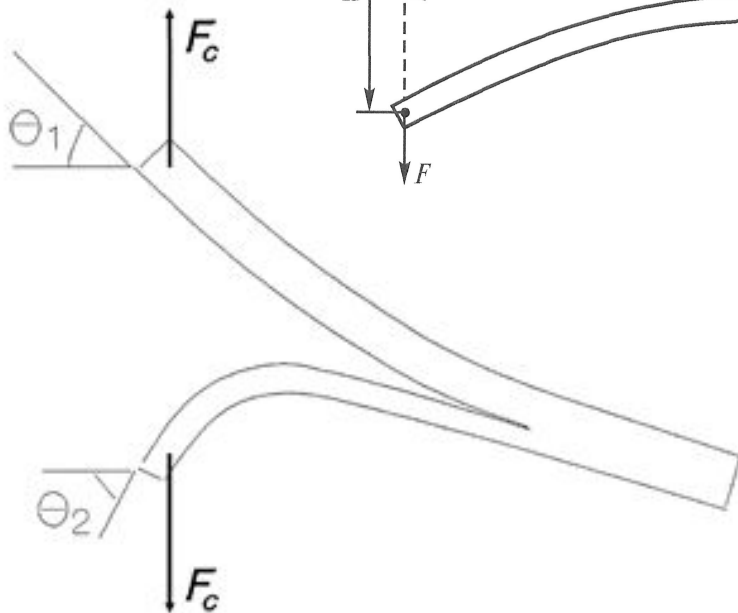
КОМПОЗИТЫ  
РОССИИ



Для стандартного  
случая

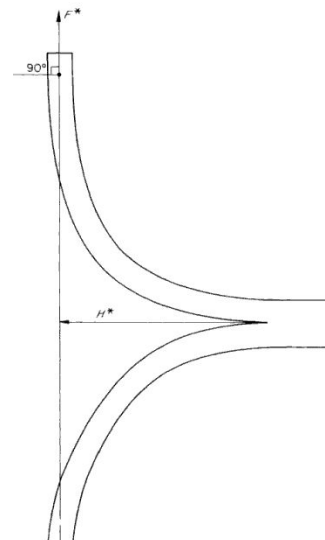
$$G_{1c} = \frac{2F_c}{w} \sin \theta$$

где  $\theta$  – угол изгиба  
консоли.



Для случая  
предельного  
изгиба консолей

$$G_{1c} = 2F_c/w.$$



Для консолей различной  
толщины

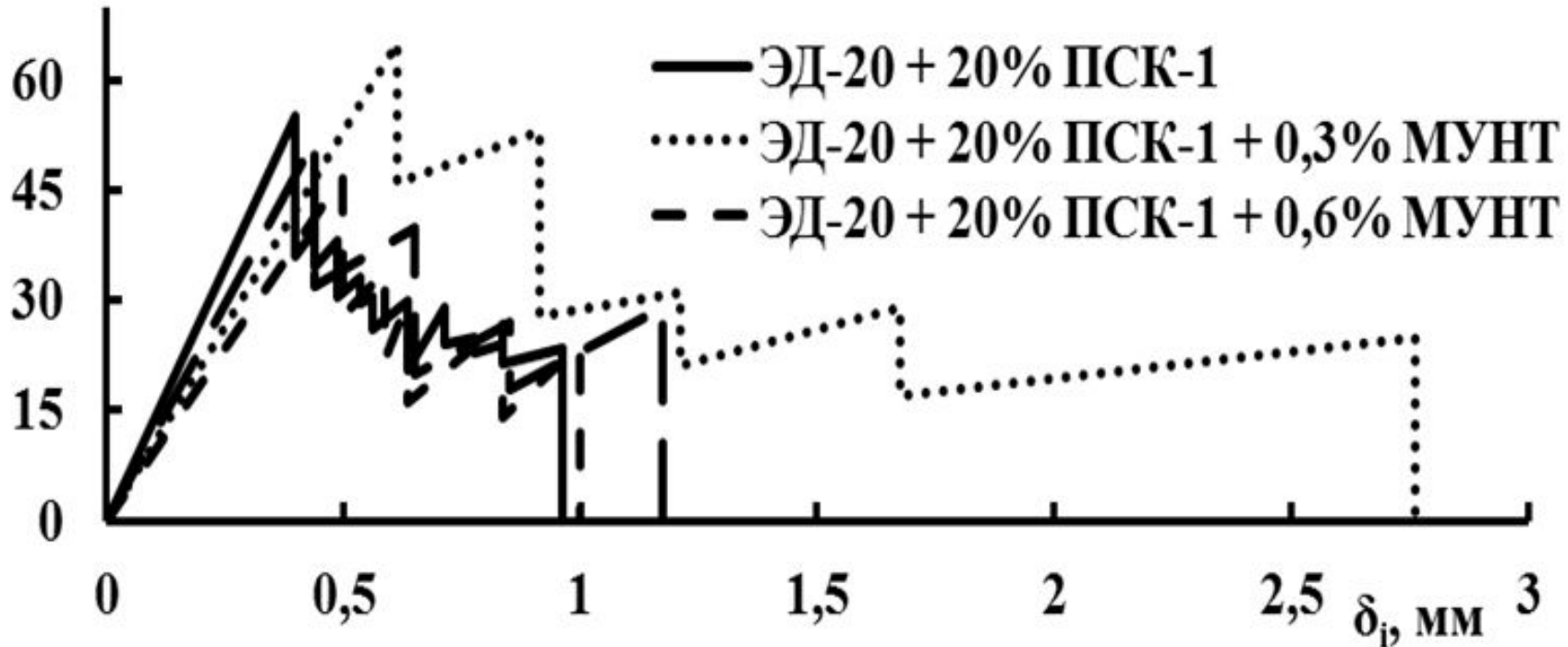
$$G_{1c} = 2 F_c (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) / w,$$





$P_i, \text{H}$

# Трещиностойкость



Добавление в смесь ЭД-20 + 20% ПСК-1 углеродных нанотрубок изменяет процесс разрушения композиций. Во всем диапазоне концентраций (0,3-1%) количество пиков уменьшается в 2 раза, что может свидетельствовать об охрупчивании.



новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии

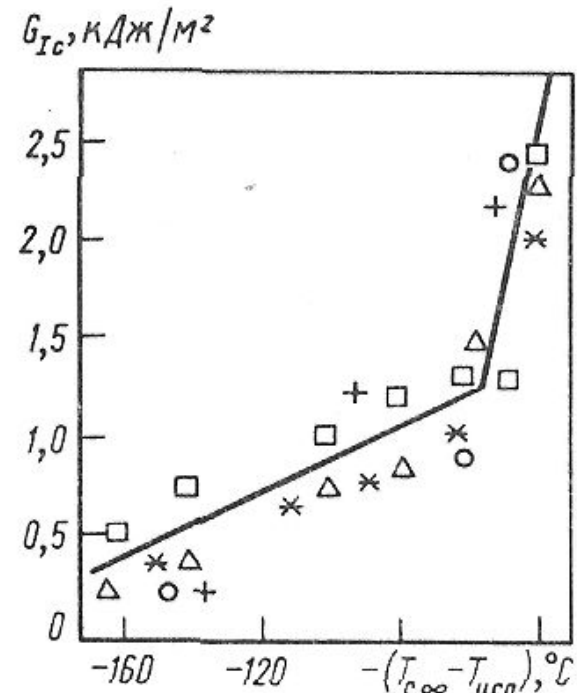
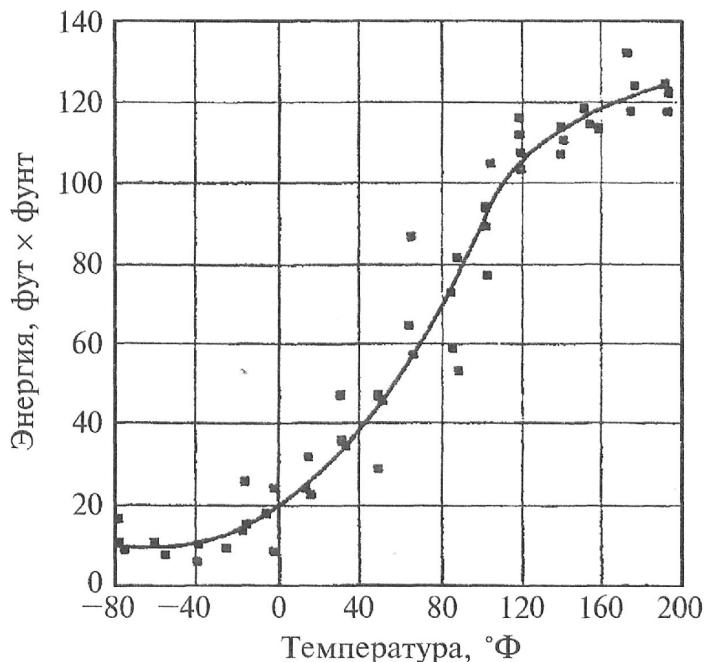
# Температура хрупкости

ИННОВАЦИОННЫЙ  
ПРОЕКТ



КОМПОЗИТЫ  
РОССИИ

В полимерах в сравнительно узком интервале температур значительно изменяется поглощение энергии и внешний вид разрушенных образцов. Эта температура соответствует изменению механизма разрушения и ее называют температурой хрупкости. При низких температурах разрушение является хрупким, и поглощается мало энергии. Выше температуры перехода разрушение является вязким и поглощается много энергии. Уменьшение температуры приводит к уменьшению энергии разрушения более чем в десять раз.



# Модули композита, полимера



новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии



Динамический механический анализ (ДМА) позволяет определять зависимость модулей от температуры, нагрузки, частоты.

## Netzsch DMA 242 E *Artemis*



# Модули композита, полимера



новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии



**Модуль упругости ( $E'$ ):** представляет собой меру жесткости и пропорционален максимуму сохраненной упругой работы во время одного периода нагрузки.

**Модуль потерь ( $E''$ ):** пропорционален работе, которая во время одного периода нагрузки диссипирует в материале. Характеризует превращение механической энергии (чаще всего в тепло) и является мерой не возвращенной, потерянной энергии колебания. Является мерой демпфирующих свойств.

**Коэффициент (тангенс угла) потерь ( $\tan\delta$ ):** является отношением между модулем потерь и модулем упругости. Характеризует механическое демпфирование или внутреннее трение вязкоупругой системы. Высокое значение  $\tan\delta$  характеризует материал с высокой неэластичной долей деформации; низкое значение  $\tan\delta$  характеризует более эластичный материал.

$$|E^*| = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A}$$

$$|E^*| = \sqrt{[E'(\omega)]^2 + [E''(\omega)]^2}$$

$$E'(\omega) = |E^*| \cdot \cos \delta$$

$$E''(\omega) = |E^*| \cdot \sin \delta$$

$$\tan \delta = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)}$$



# Модули композита, полимера

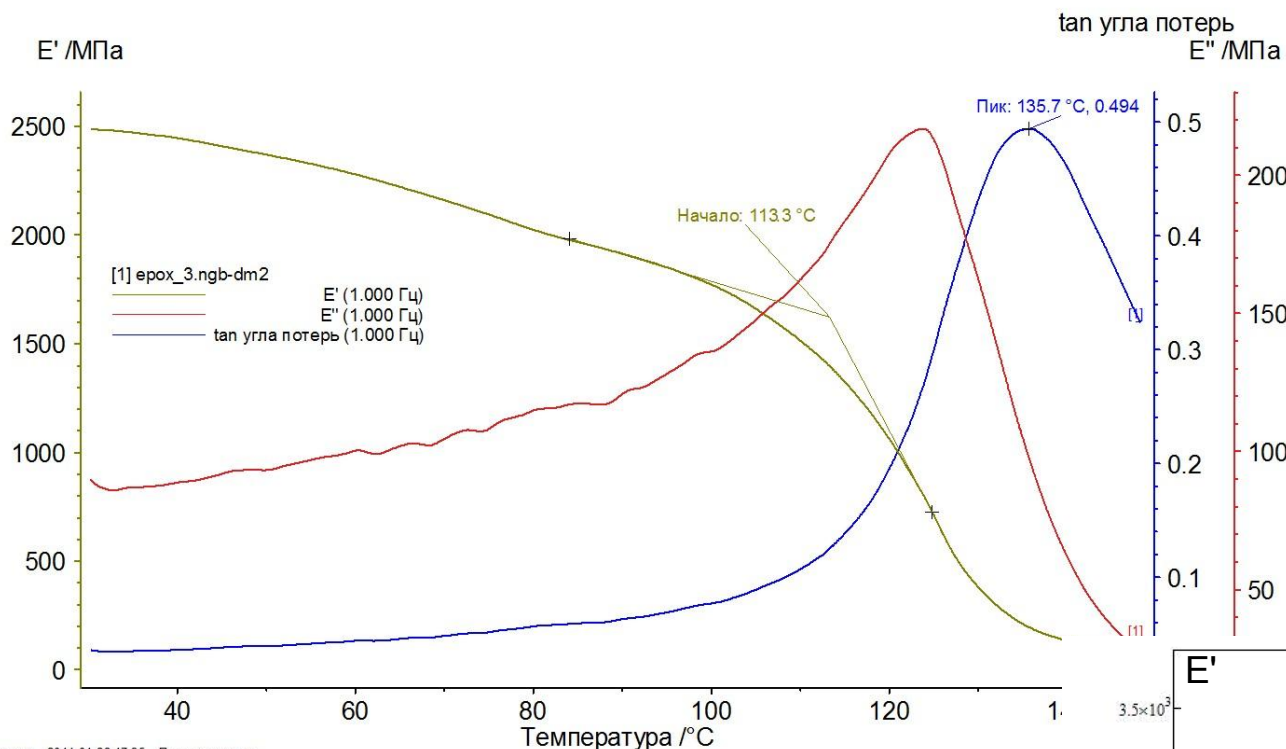


новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
И НАНОТЕХНОЛОГИИ

ИННОВАЦИОННЫЙ  
ПРОЕКТ



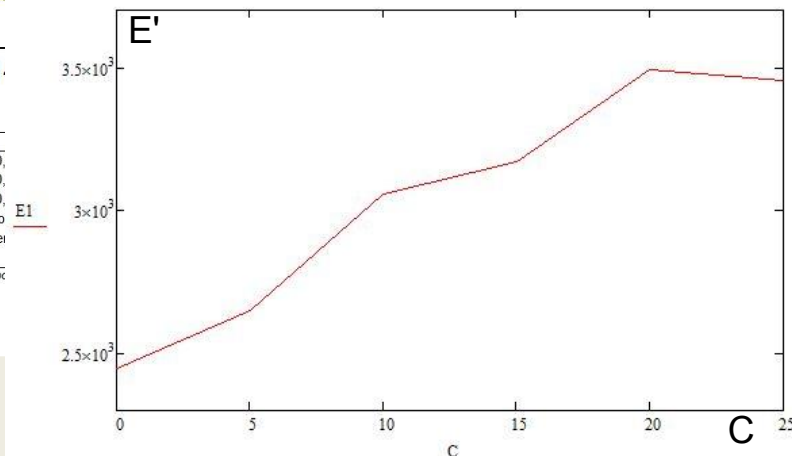
КОМПОЗИТЫ  
РОССИИ



Прибор : NETZSCH DMA 242		Файл : C:\NETZSCH\Proteus61\data\epox_3.ngb-dm2	
Код образца : 3	Размеры образца : 50.000x10.100x4.430 mm	Темп. диапазон : 30.0°C/2.0(К/мин)/150.0°C	Калибровка : 30,10
Дата/время : 23.01.2014 14:28:28	Режим деформ. : 3-точ. изгиб 50	Сегменты : 1/1	Калибровка : 30,10
Лаборатория : СМ	Амплитуда : 60.00 um	Частота : 1Hz;10Hz;50Hz	Калибровка : 30,10
Оператор : Тараскин	ДС/ФСС : 6.55 N / 0.50 N	Атмосфера : Ar	Калибровка : rotatio
Проект : FAM	КП : 1.10	Поток газа : 100 ml/min	Темп. калиб. : tcalzei
Образец/форма : епок/Кубический	Материал : Эпоксид. смола LE-848	Сглаживание : 1e-005/1 - Неск. см коэфф-тов	

Создано при

Зависимость модуля упругости E' от концентрации C дисперсного наполнителя

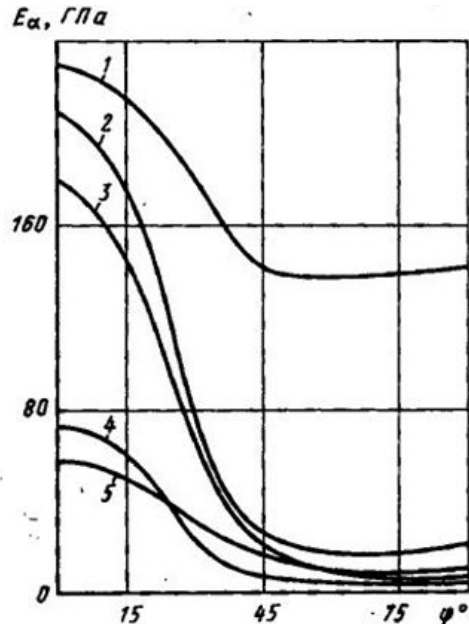






новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
И НАНОТЕХНОЛОГИИ

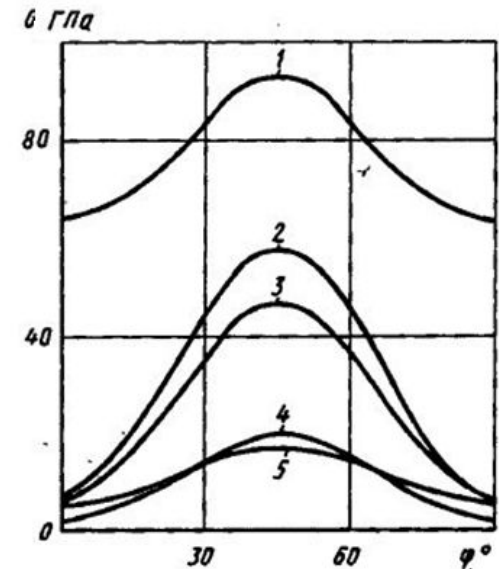
# Зависимость модулей от угла армирования



Зависимость модуля упругости от угла армирования для материалов: 1 — бороалюминия; 2 — боропластика; 3 — углепластика; 4 — органиоластика; 5 — стеклоластика

$$E_c = FE_f V_f + E_m V_m$$

F — коэффициент учитывающий разориентацию волокон  
Vf и Vm — объемные доли волокон и матрицы  
Ef и Em — модули упругости волокон и матрицы



Зависимость модуля сдвига от угла армирования для материалов: 1 — бороалюминия; 2 — боропластика; 3 — углепластика; 4 — органиоластика; 5 — стеклоластика

Свойства	Углеродное волокно		Эпоксидная матрица
	Высокомодульное	Высокопрочное	
Модуль, ГПа	230...530	210...350	4
Прочность при растяжении, ГПа	1,9...2,1	2,5...3,2	0,09

# Правило смесей для волокнистых композитов



новые материалы

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m$$

ИННОВАЦИОННЫЙ  
ПРОЕКТ

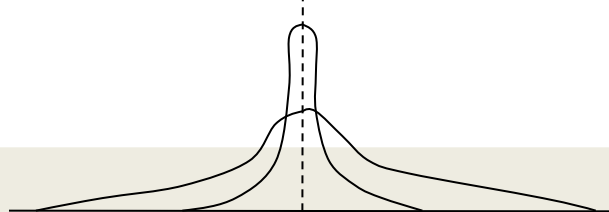


КОМПОЗИТЫ  
РОССИИ

Правило смесей **справедливо** для определения:

- **продольного модуля упругости;**
- **модуля сдвига** однонаправленного материала в плоскости волокон;
- **прочности** при продольном растяжении;
- **плотности.**

Правило смесей справедливо только при малой дисперсии прочности волокон. Узким распределением обладают только металлические волокна. УВ являются хрупкими и им присуща большая дисперсия.



Правило смесей **не справедливо** для определения:

- **поперечного модуля упругости** (определяется жесткости матрицы и ее объемным содержанием);
- **прочность при поперечном растяжении** (определяется прочностью матрицы);
- **прочность при продольном сдвиге** (сдвиговая нагрузка приложена параллельно волокнам. Определяется адгезионной прочностью матрица-волокно).

# Адгезионная прочность между волокном и матрицей

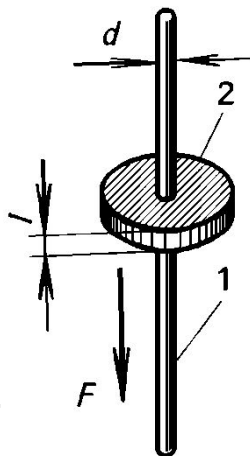
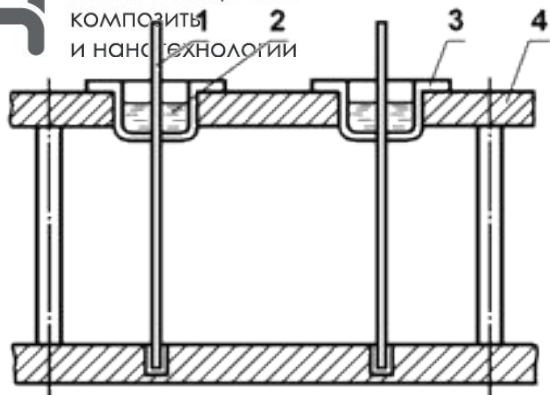


новые материалы  
композиты  
и нанотехнологии

ИННОВАЦИОННЫЙ  
ПРОЕКТ

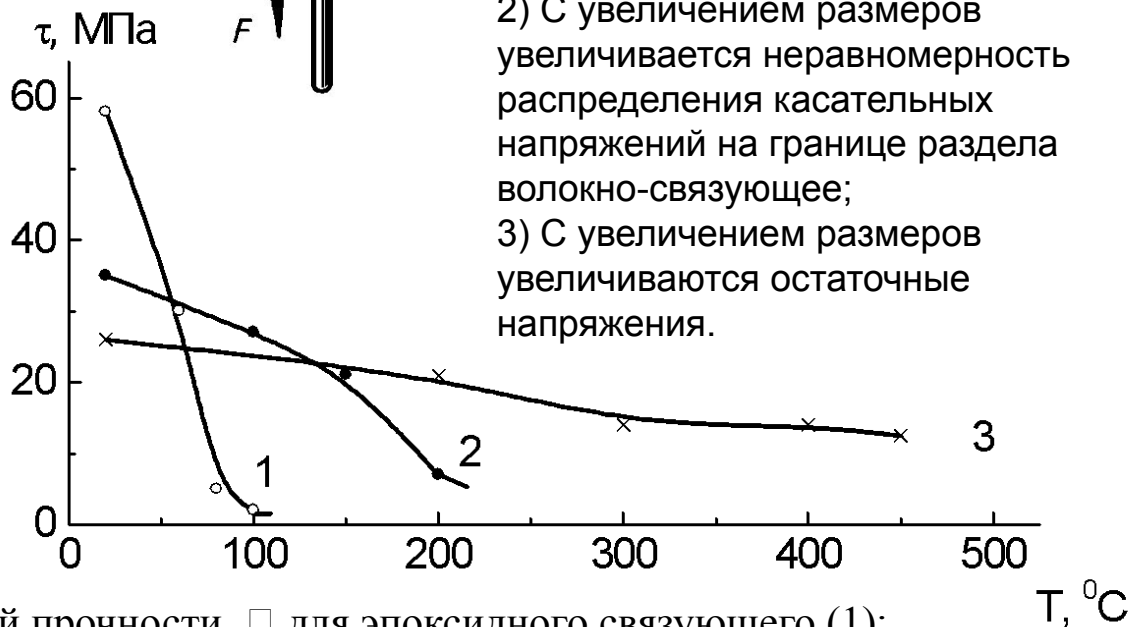
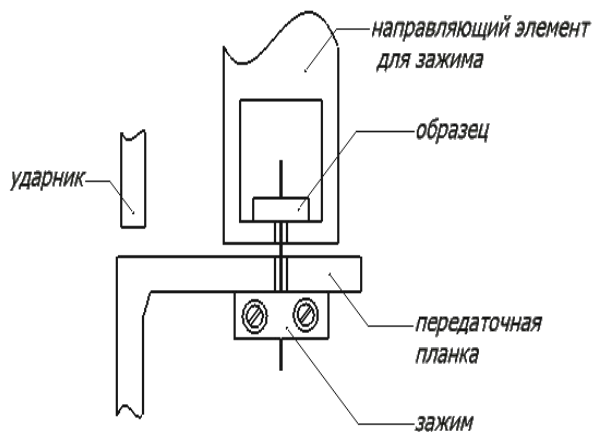


КОМПОЗИТЫ  
РОССИИ



С увеличением площади контакта волокно (1) - связующее (2) значение адгезионной прочности уменьшается, что связано:

- 1) С увеличением размеров увеличивается вероятность появления дефектов;
- 2) С увеличением размеров увеличивается неравномерность распределения касательных напряжений на границе раздела волокно-связующее;
- 3) С увеличением размеров увеличиваются остаточные напряжения.



Результаты определения адгезионной прочности, □ для эпоксидного связующего (1);  
эпоксиполисульфон (2); эпоксиполиимид (3) при различных температурах.



новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии

# Адгезионная прочность

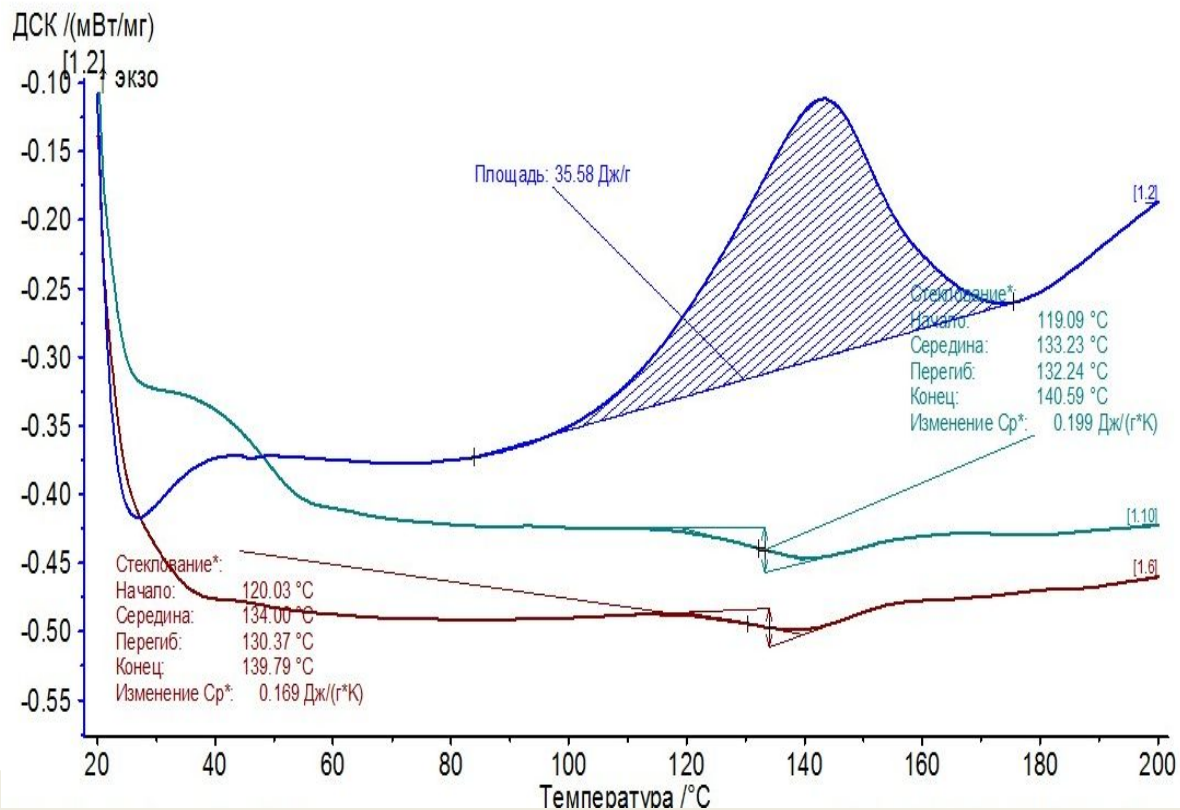


Наполнитель	Увеличение адгезионной прочности	Концентрация наполнителя, $C_{\text{мас.}}$
Шунгит-30	17%	10%
Ca <sup>++</sup> монтмориллонит (глина)	35%	10%
Аэросил	42%	10%
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	12%	2,5%
$\text{Al}_3\text{OH}$ ( $d = 1\text{мкм}$ )	25%	50%
$\text{Al}_3\text{OH}$ ( $d = 3\text{мкм}$ )	21%	30-50%
$\text{Al}_3\text{OH}$ ( $d = 3\text{мкм}$ )	24%	100%



новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии

# Определение температуры стеклования





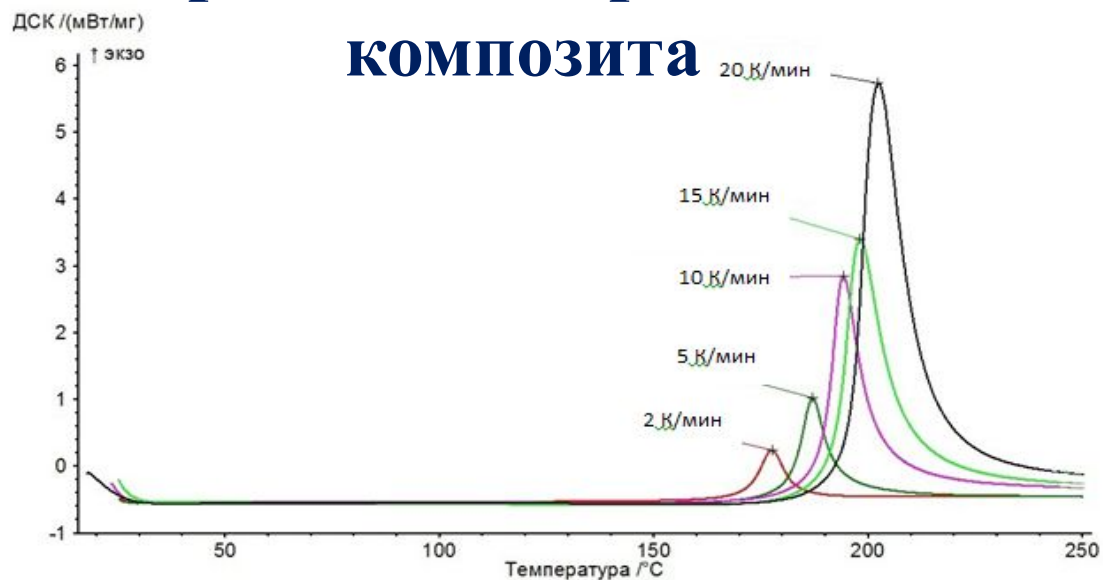
новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии

# Определение количества выделяемого тепла в процессе отверждения композита

ИННОВАЦИОННЫЙ  
ПРОЕКТ



КОМПОЗИТЫ  
РОССИИ



Скорость нагрева, К/мин	Температура максимальной скорости химической реакции, °C	Количество выделяемого тепла, Дж/г
2	177,57	194,3
5	187,06	196,3
10	194,26	224,5
15	198,14	225,2
20	202,28	263,6

# Свойства связующих



Характеристика	Связующие		
	фенолформальдегидные	полиэфирные	эпоксидные
Предел прочности, МПа: при растяжении $\sigma_1^+$	40-70	30-70	35-100
При сжатии $\sigma_1^-$	100-125	80-150	90-160
Модуль упругости $E$ , ГПа	7-11	2,8-3,8	2,4-4,2
Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	1,2-1,3	1,2-1,35	1,2-1,3
Теплостойкость по Мартенсу, °С	140-180	50-80	130-150
Относительное удлинение, %	0,4-0,5	1,0-5,0	2-9
Объемная усадка, %	15-20	5-10	1-5
КЛТР $\alpha \cdot 10^5$ , 1/°С	6,0-8,0	6,0-9,0	4,8-8,0
Водопоглощение за 24 ч, %	0,3-0,4	0,1-0,2	0,01-0,08

Свойство	Стекланные волокна					
	Е (с бором)	Е (без бора)	S	AR	ECR	Базальт
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2540-2550	2620	24802490	2600-2700	2660-2680	2670
Коэффициент линейного расширения, 10 <sup>6</sup> С <sup>-1</sup>	4,9-6,0	6	2,9	7,5	5,9	-
Прочность при растяжении, ГПа	3-3,5	3,1-3,5	4,44,6	3,1-3,5	2,8-3	2,7-3,5
Коэффициент Пуассона	0,18-0,24					
Модуль упругости, ГПа	76-78	80-81	88-91	72-74	80-83	70-90
Удлинение до разрыва, %	4,5-4,9	4,6	4,5-4,9	2,0-2,4	4,5-4,9	3

Свойства	Углеродные волокна							
	УК	УК-П	АРГО-С	УКН-5000	УКН-М-3К	УКН-М-6К	УКН-М-12К	УКН-П
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1750	1730	1730	1750	1750	1750	1750	1730
Прочность при растяжении, ГПа	2	2,8	2	2,5	3,5	4	4,5	4,4
Удлинение до разрыва, %	0,3	0,2	0,5					
Удельное объемное сопротивление, Ом	75	75	12,5	62	150	66	26	-
Модуль упругости при изгибе, ГПа	90	90	140	120	225	225	225	235



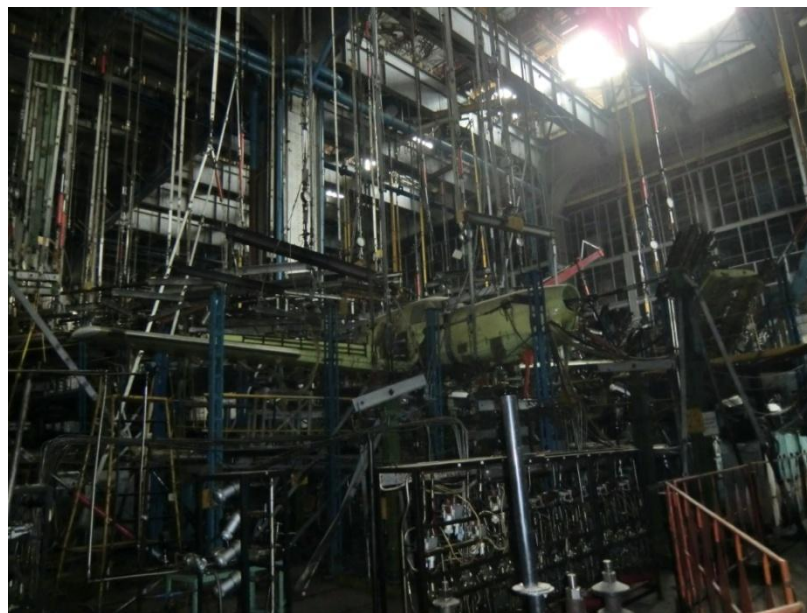
# Испытание реальных конструкций



новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии



Машина для растяжения образцов с нагрузкой 2500 тонн.



Самолет в зале статических испытаний



новые материалы  
КОМПОЗИТЫ  
и нанотехнологии

ИННОВАЦИОННЫЙ  
ПРОЕКТ



КОМПОЗИТЫ  
РОССИИ

# Thank you for attention

[malyin@mail.ru](mailto:malyin@mail.ru)

