



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;

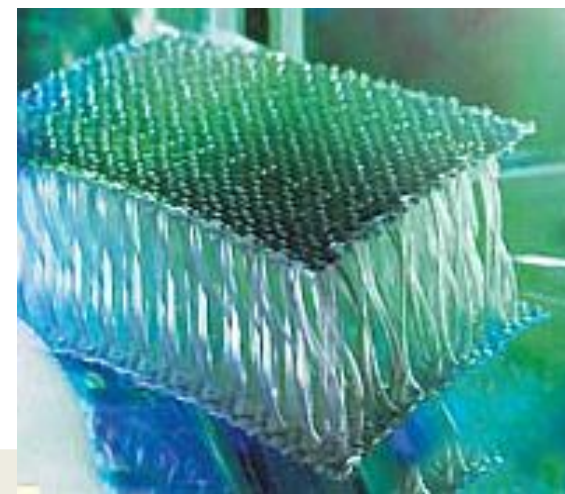
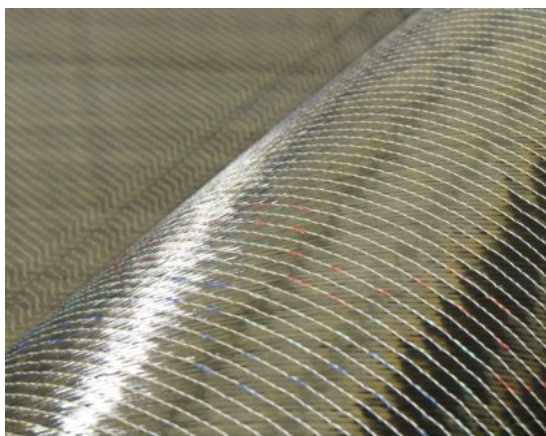


Связующие

- полиэфирные;
- винилэфирные;
- эпоксидные;

Наполнители

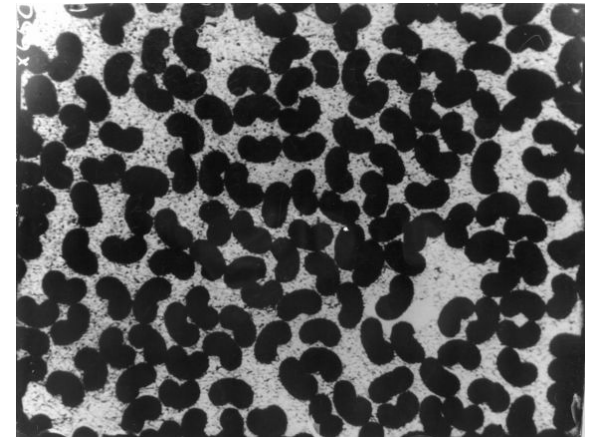
- бальзовая древесина;
 - пенопласты;
 - маты;
 - соты;



- **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

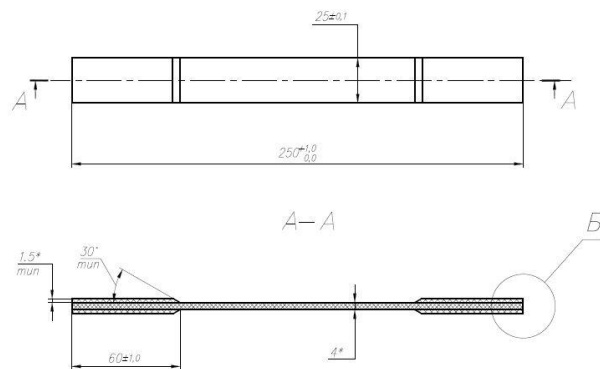
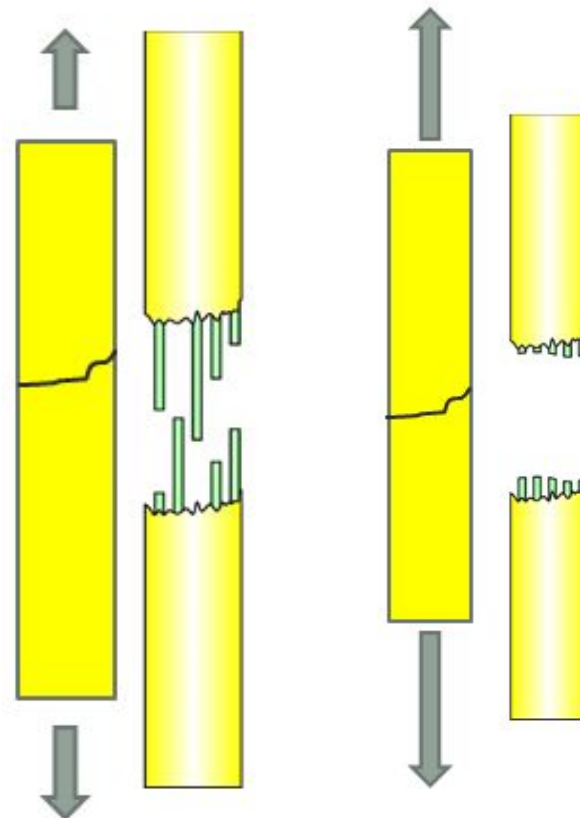


новые материалы
композиты
и нанотехнологии

Растяжение композита, полимера, волокна



σ^+



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



новые материалы
композиты
и нанотехнологии

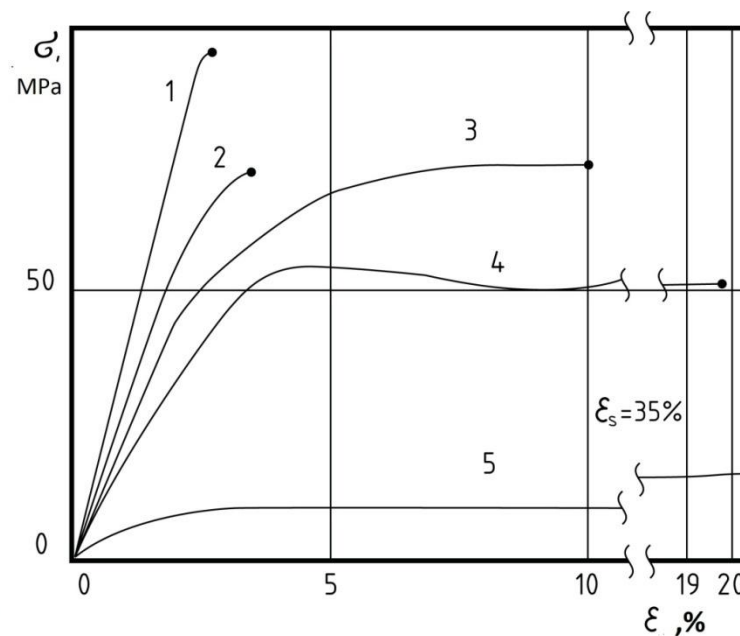
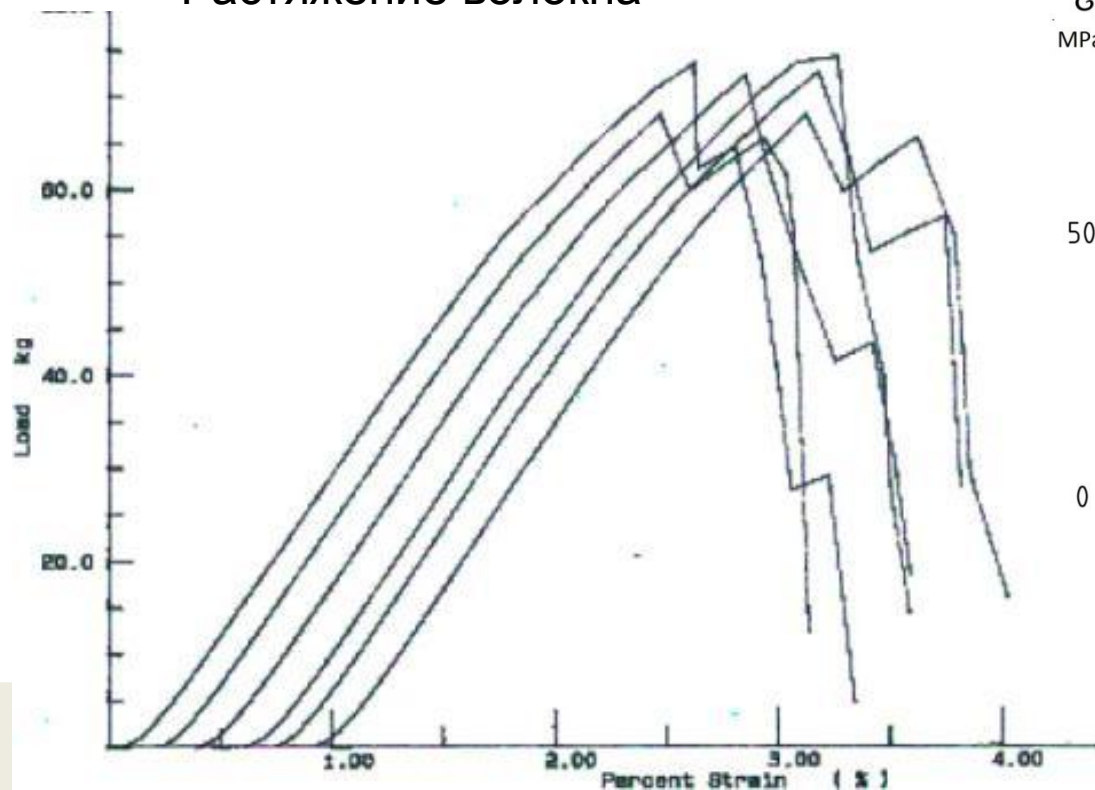
Растяжение волокна, полимера, композита



Растяжение полимера:

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

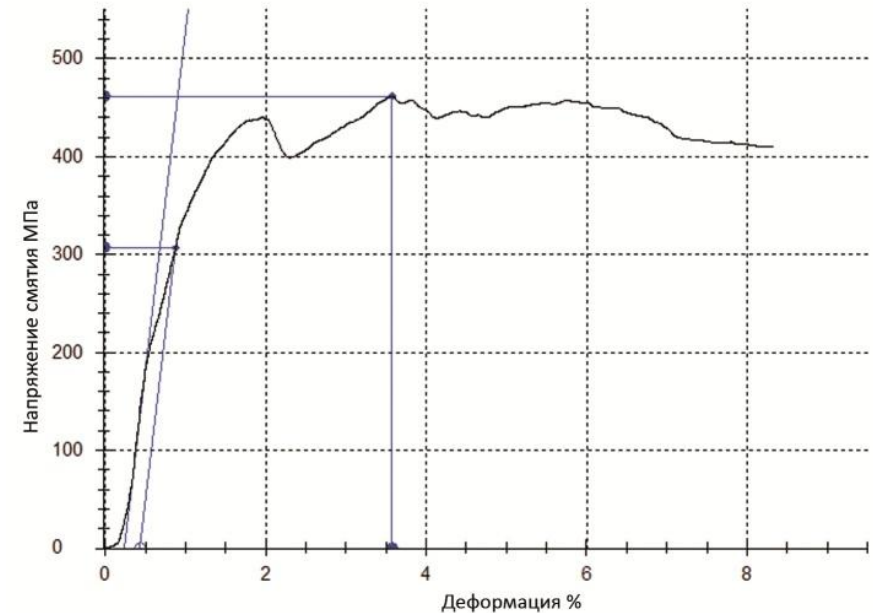
Растяжение волокна





новые материалы
композиты
и нанотехнологии

Сжатие композита, полимера



Проблемы:

Потеря устойчивости образца

Разрушение торцов

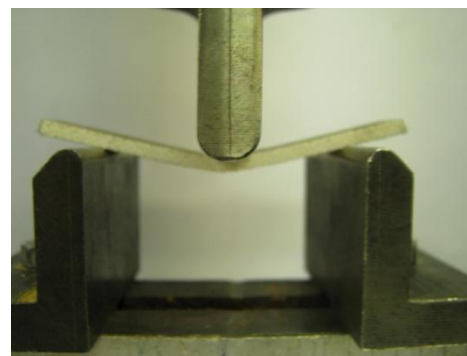
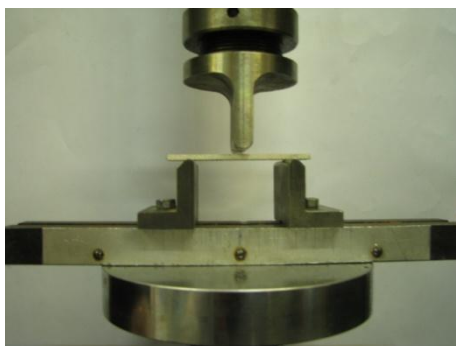
Сложно мерить предельную деформацию

σ^-

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



новые материалы
композиты
и нанотехнологии

Прочность при межслоевом сдвиге

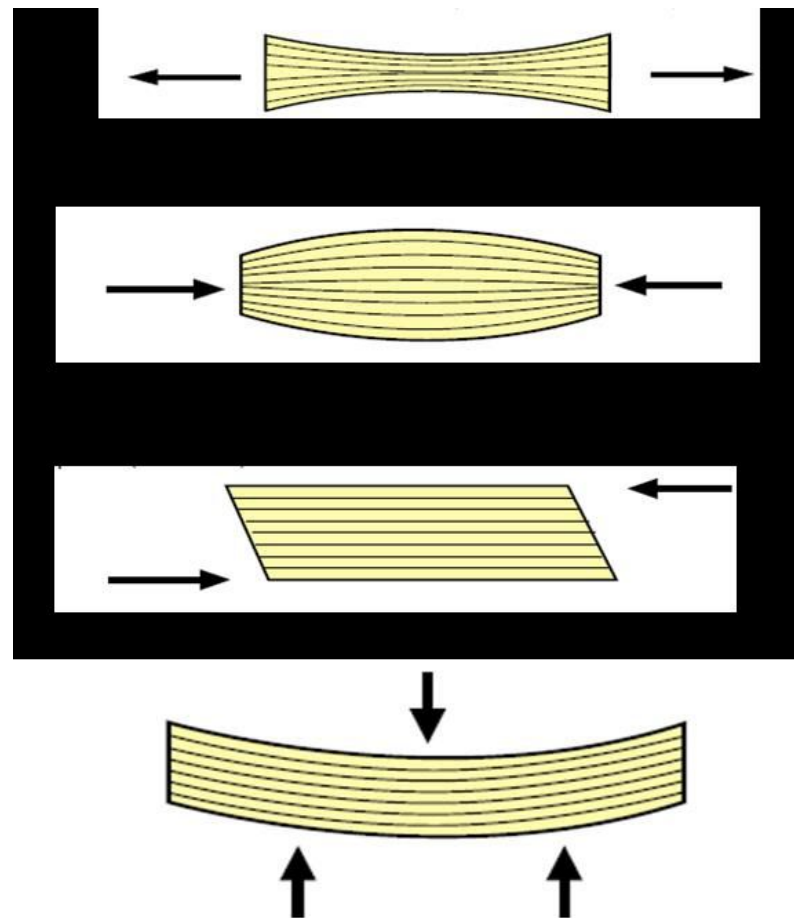


Растяже
ние

Сжатие

Межслой
ный сдвиг

Изгиб



Изгиб, сжатие, растяжение для изотропного композита

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)

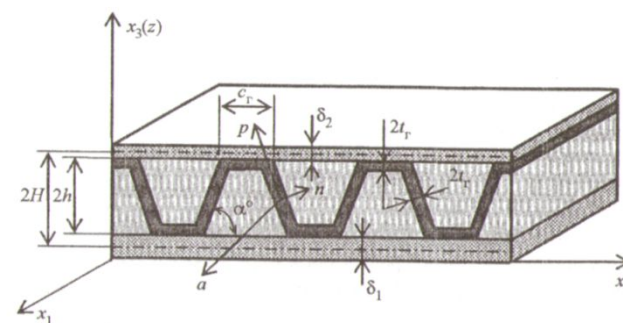
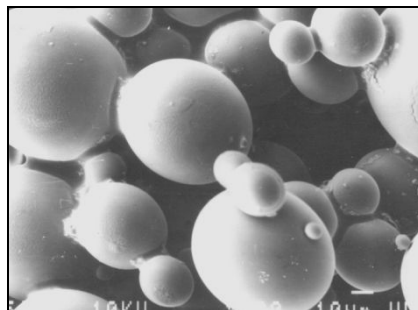


Для металлов предел выносливости составляет 0,2-0,3 от кратковременной прочности. Для углепластиков (высокомодульных) **предел выносливости достигает 0,5-0,7**.

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

Материалы	σ^+ , МПа	σ^- , МПа	E, ГПа	γ кг/см ³	$\frac{E}{\gamma}$	$\frac{\sigma}{\gamma}$
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 ³	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				



новые материалы
композиты
и нанотехнологии

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/м²)

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

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

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.
 α, β – 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.





новые материалы
композиты
и нанотехнологии

Ударная вязкость полимеров

ИННОВАЦИОННЫЙ
ПРОЕКТ



КОМПОЗИТЫ
РОССИИ

Количество термопластика, %	Тип термопластика			
	Полисульфон	Полиэфиримид	Полисульфон	Полисульфон
	Изгиб , МПа		Ударная вязкость, кДж/м2	
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



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, г/м^3	600-800	700	600-620
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа, не менее	30	40	35
Ударная вязкость, кДж/м^2	0,5-0,7	3,0	1,0-1,5



новые материалы
композиты
и нанотехнологии

Трещиностойкость

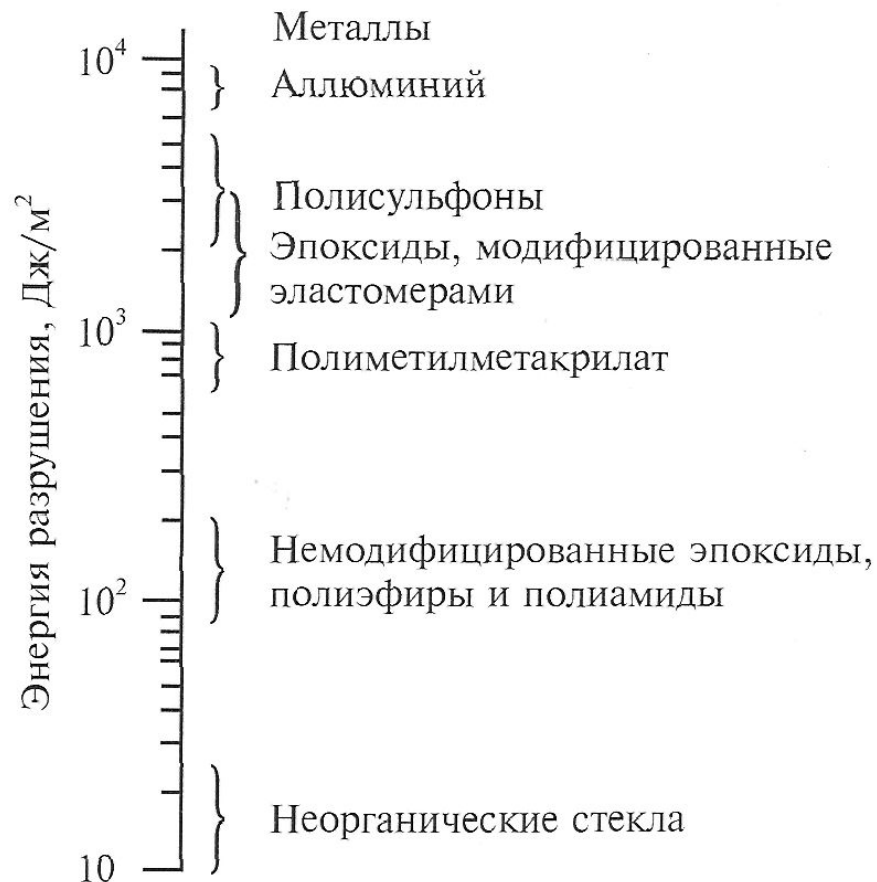
ИННОВАЦИОННЫЙ
ПРОЕКТ



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_{Ic}** , предел ползучести и предел усталости.

Типичные значения вязкости разрушения терморезистивных полимеров составляют 200–600 Дж/м². Для термопластичных полимеров и металлов эта величина на порядок выше.





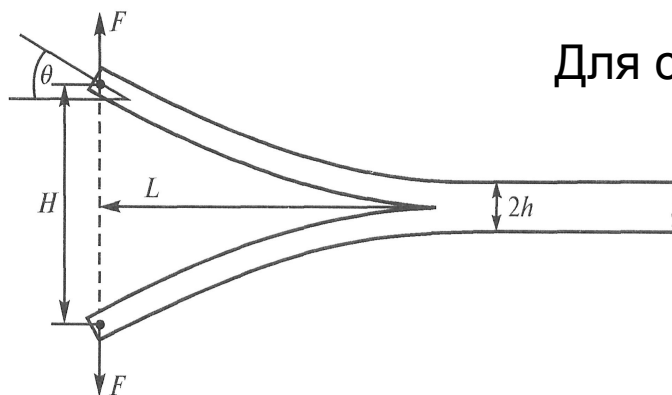
новые материалы
композиты
и нанотехнологии

Трещиностойкость

ИННОВАЦИОННЫЙ
ПРОЕКТ



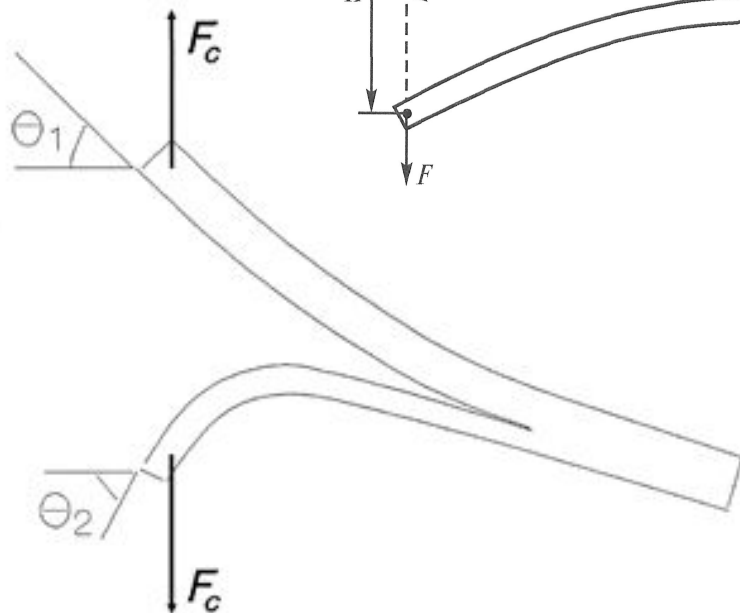
КОМПОЗИТЫ
РОССИИ



Для стандартного
случая

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

где θ – угол изгиба консоли.

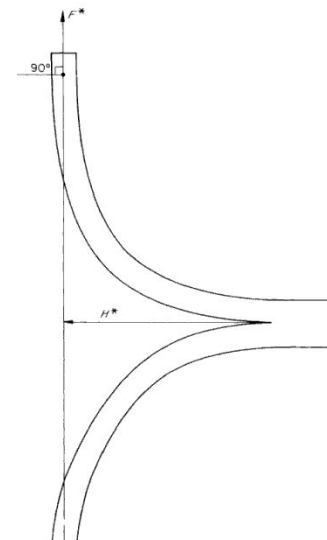


Для консолей различной
толщины

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

Для случая
предельного
изгиба консолей

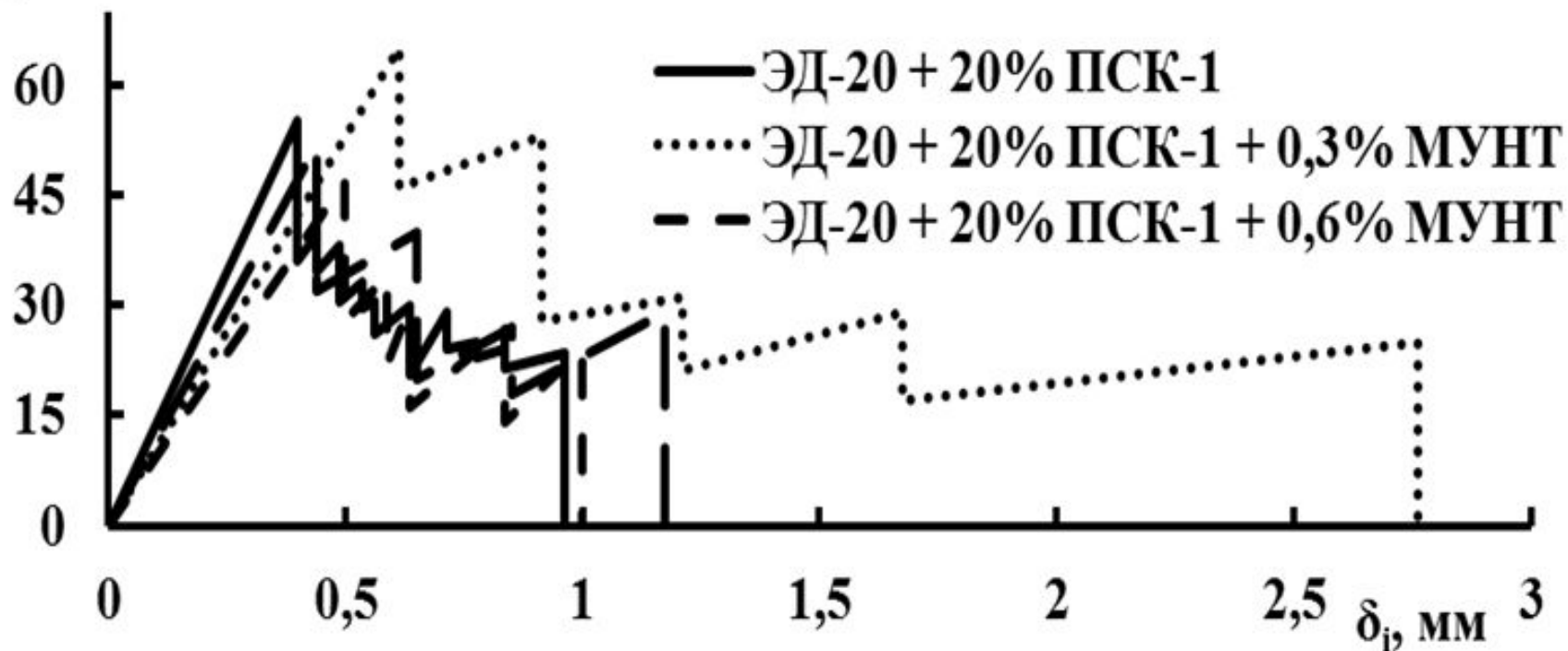
$$G_{1c} = 2F_c / w.$$





$P_i, \text{Н}$

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.

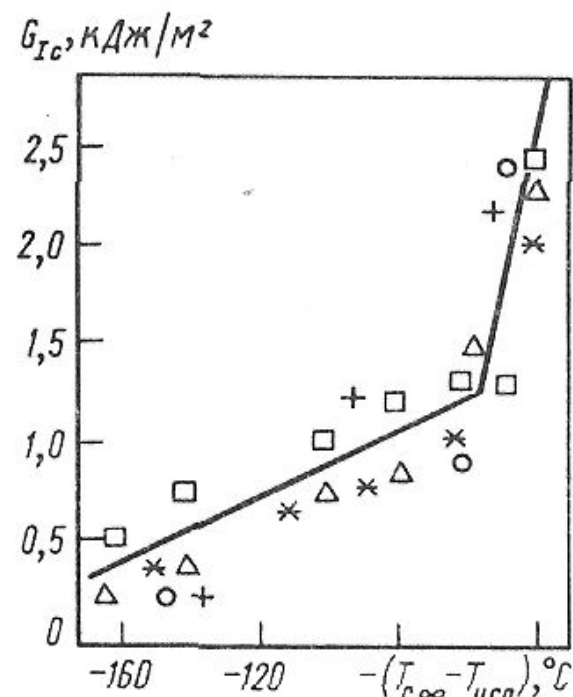
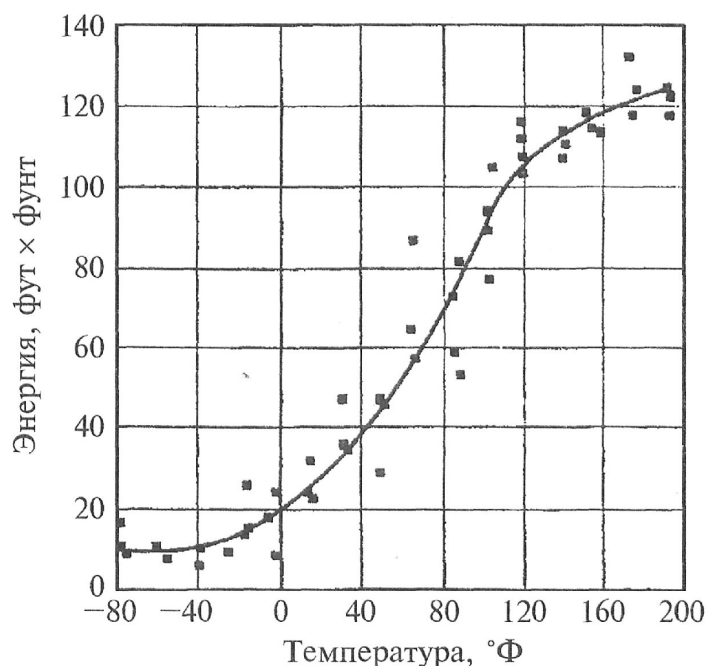


новые материалы
композиты
и нанотехнологии

Температура хрупкости



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.





новые материалы
композиты
и нанотехнологии

Модули композита, полимера



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

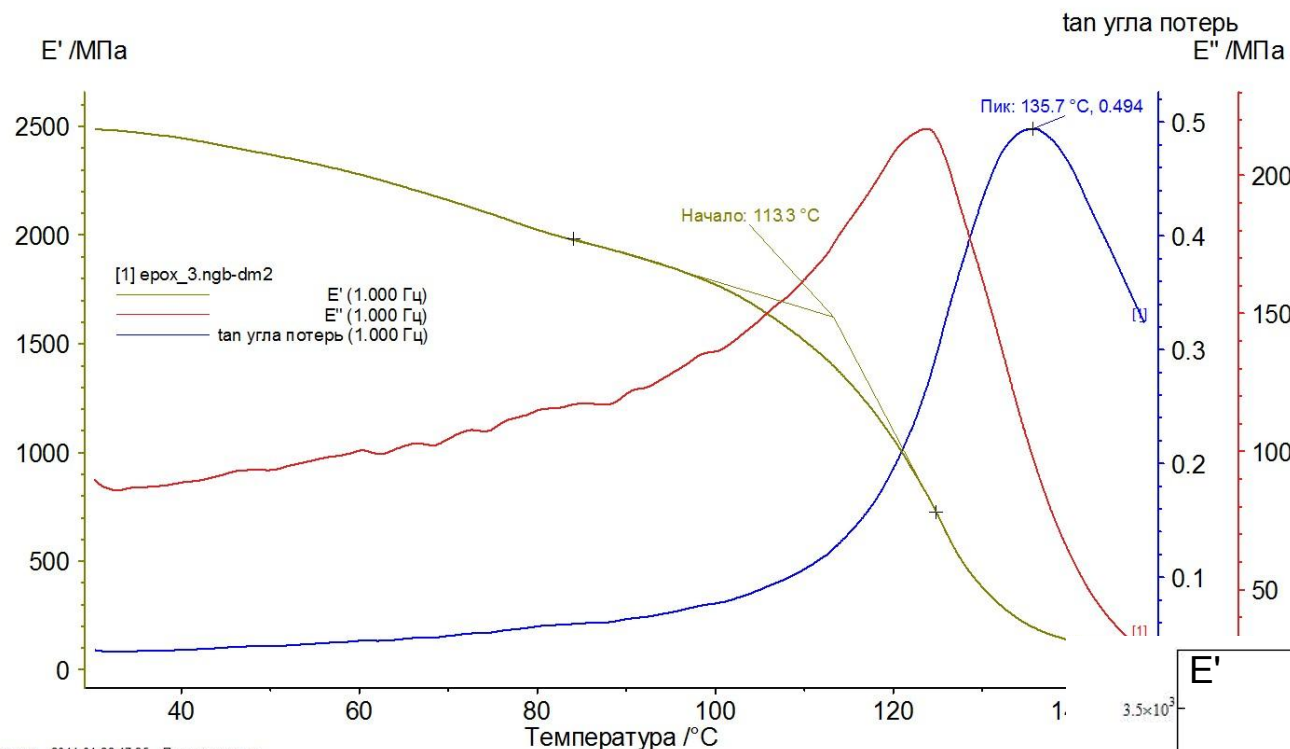


новые материалы
КОМПОЗИТЫ
и нанотехнологии

ИННОВАЦИОННЫЙ
ПРОЕКТ



КОМПОЗИТЫ
РОССИИ

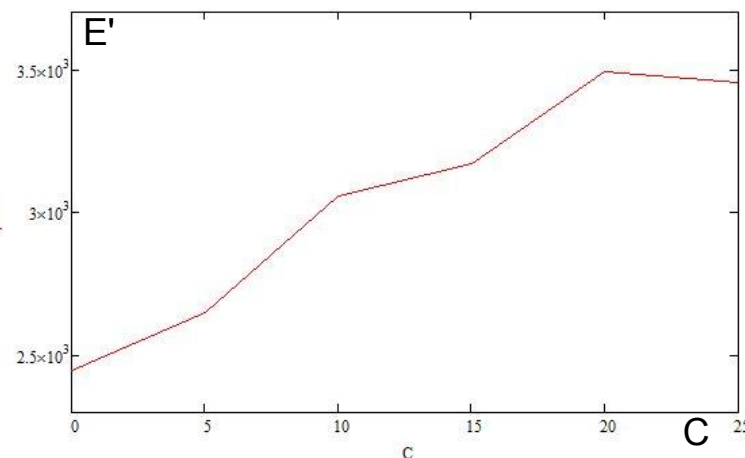


Главное 2014-01-28 17:35 Пользователь: а

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(K/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: epox/Кубический	Материал: Эпоксид. смола LE-848	Сглаживание: 1e-005/1 - Неск. см коэфф-тов	

Создано пр

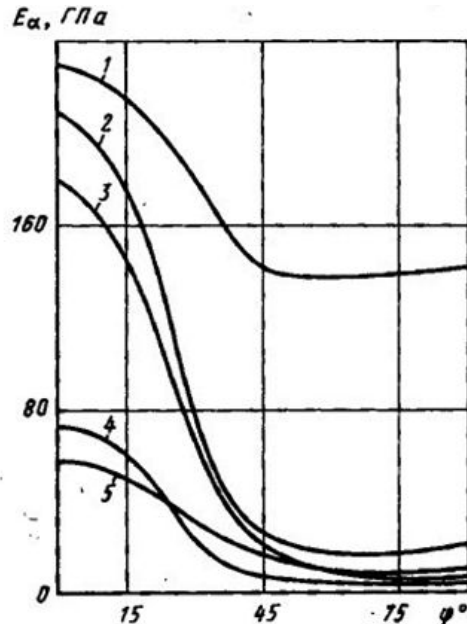
Зависимость модуля упругости E' от концентрации C дисперсного наполнителя





новые материалы
композиты
и нанотехнологии

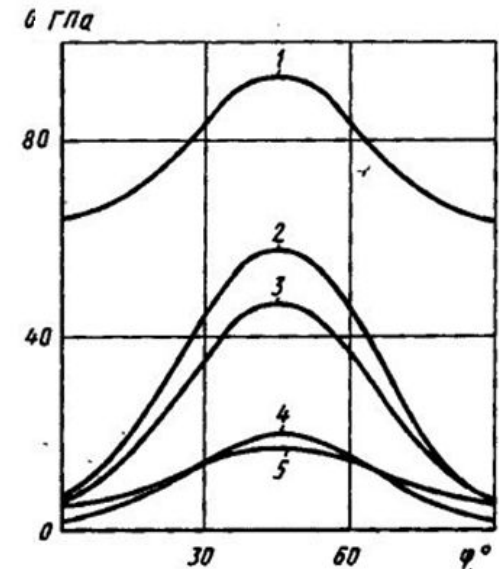
Зависимость модулей от угла армирования



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

$$E_c = F E_f V_f + E_m V_m,$$

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 — органиопластика; 5 — стеклопластика

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

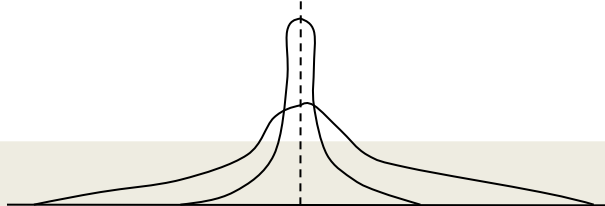


КОМПОЗИТЫ
РОССИИ

Правило смесей **справедливо** для определения:

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

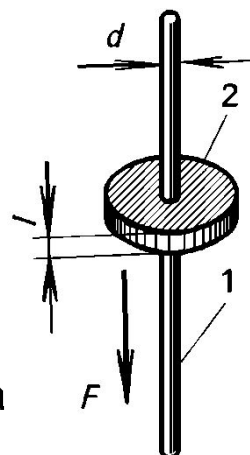
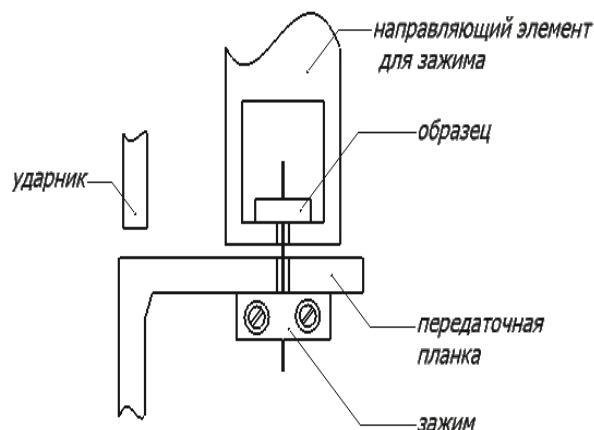
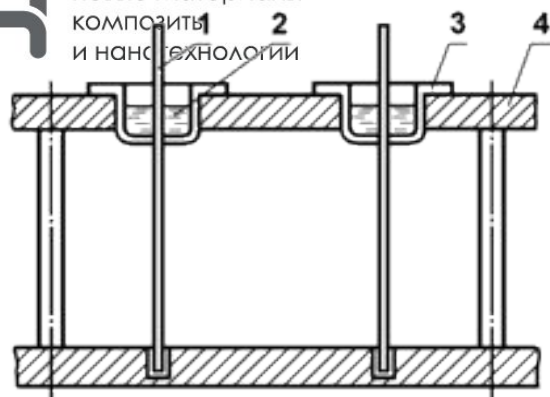
Правило смесей справедливо только при малой дисперсии прочности волокон. Узким распределением обладают только металлические волокна. УВ являются хрупкими и им присуща большая дисперсия.



Правило смесей **не справедливо** для определения:

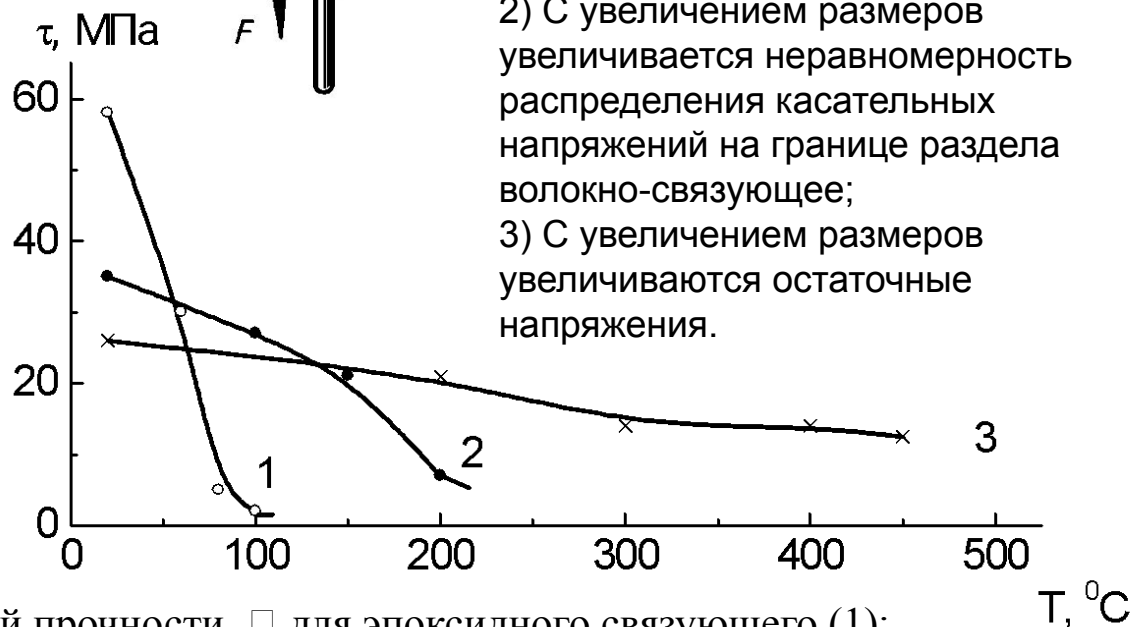
- **поперечного модуля упругости** (определяется жесткости матрицы и ее объемным содержанием);
- **прочность при поперечном растяжении** (определяется прочностью матрицы);
- **прочность при продольном сдвиге** (сдвиговая нагрузка приложена параллельно волокнам. Определяется адгезионной прочностью матрица-волокно).

Адгезионная прочность между волокном и матрицей



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

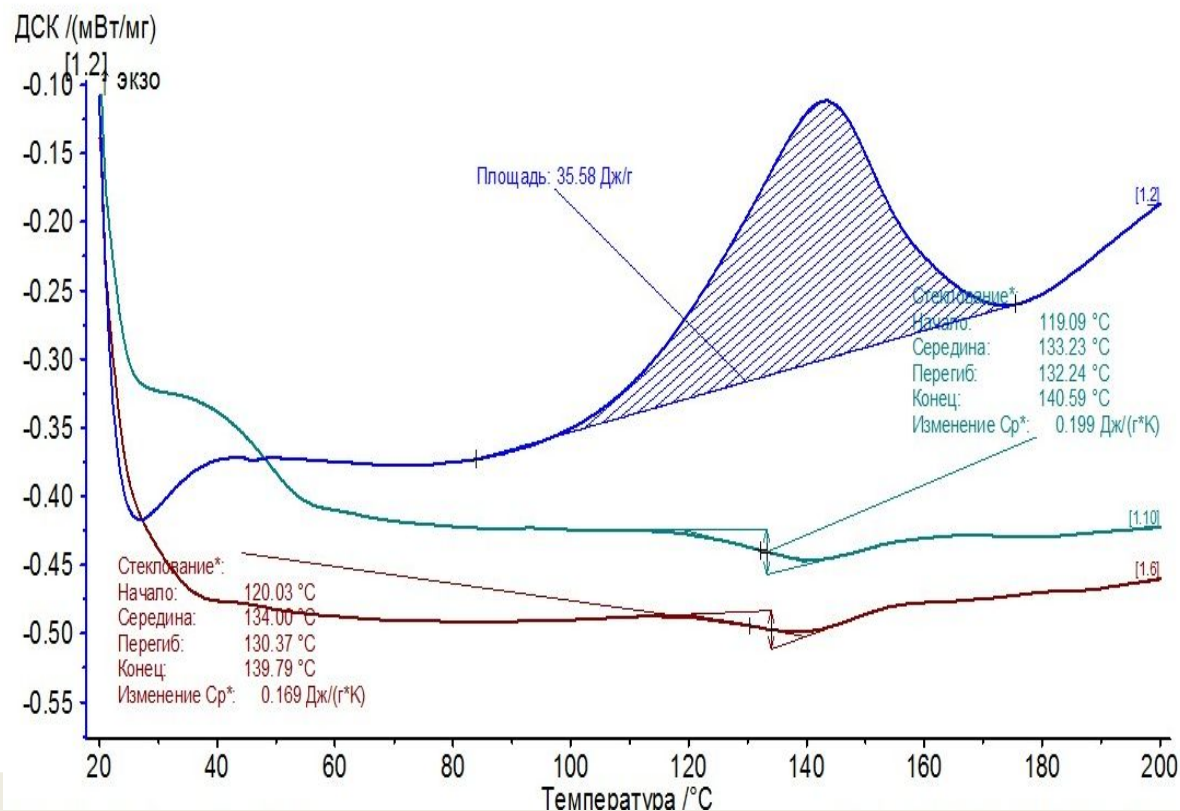


Наполнитель	Увеличение адгезионной прочности	Концентрация наполнителя, $C_{\text{мас.}}$
Шунгит-30	17%	10%
Ca^{++} монтмориллонит (глина)	35%	10%
Аэросил	42%	10%
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	12%	2,5%
Al_3OH ($d = 1\text{мкм}$)	25%	50%
Al_3OH ($d = 3\text{мкм}$)	21%	30-50%
Al_3OH ($d = 3\text{мкм}$)	24%	100%



новые материалы
композиты
и нанотехнологии

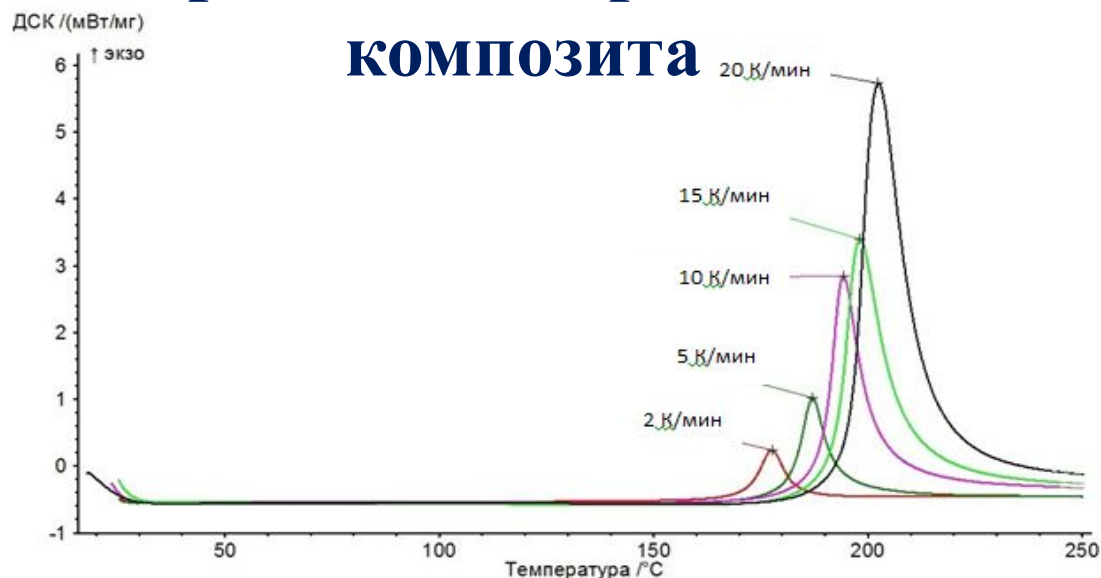
Определение температуры стеклования





новые материалы
композиты
и нанотехнологии

Определение количества выделяемого тепла в процессе отверждения композита



Скорость нагрева, К/мин	Температура максимальной скорости химической реакции, °С	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



новые материалы
композиты
и нанотехнологии

Свойства связующих



Характеристика	Связующие		
	фенолформальдегидные	полиэфирные	эпоксидные
Предел прочности, МПа: при растяжении σ_l^+	40-70	30-70	35-100
При сжатии σ_l^-	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 ³	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 ³	2540-2550	2620	24802490	2600-2700	2660-2680	2670
Коэффициент линейного расширения, 10 ⁶ С ⁻¹	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 ³	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



Thank you for attention

malyin@mail.ru

