

*Конструкционные
функциональные волокнистые
композиты*

лектор

к.т.н., доцент

Микрюков Константин Валентинович

Темы

- Стеклопластики
- Пресс-материалы
- Премиксы
- Боропластики
- Органопластики
- Углепластики
- Гибридные композиты
- Сотопласты

Стеклопластики

Типы стеклопластиков и их классификация

	Тип армирующего материала	Классы стеклопластиков
Ориентированные стеклопластики	Нить, ровинг	Однонаправленный ортогонально-армированный; со сложной схемой армирования
	Ткань; нетканый ориентированный клееный или вязально-прошивной материал	Стеклотекстолит
Хаотически армированные стеклопластики	Рубленая нить	На основе премиксов; препрегов, стекломатов
	Непрерывная нить	На основе матов типа ХЖКН; пресс-материалов типа АГ-4В

Особенности стеклопластиков

Материал	Плотность, кг/м ³	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, не менее	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Удельная прочность, км	Удельная жесткость км	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м•К)	Термический коэффициент линейного расширения 10 ⁷ , К ⁻¹
<i>Металлы</i>							
Сталь Ст. 3	7800	400	200	5,10	2560	65	1,3
Алюминиевый сплав Д-16	2800	300	72	10,7	2580	150	2,2
Титан	4500	350	115	17,8	2560	—	—
<i>Древесина</i>							
Сосна	550	100	10	13,8 *	1540	0,35	0,6
Дуб	720	130	15	15,2	1750	0,5	1,0
<i>Пластмассы</i>							
Полиэтилен	960	20	0,5	2,1	52	0,3	10
Винипласт	1400	60	3	4,3	210	0,1	6,5
Пресс-порошок фенольный	1300	45	8	3,5	610	0,2	10
<i>Стеклопластики</i>							
Однонаправленный	2000	1600	56	80,0	2800	0,4	1
Стеклотекстолит	1900	500	30	26,2	1570	0,3	1,5
Хаотически армированный	1400	100	8	6,7	530	0,25	2,5

Недостатки стеклопластиков

- Структурная неоднородность и недостаточная стабильность технологии изготовления
- Чувствительность стеклопластиков к предыстории изготовления и к температурно-временному режиму последующей эксплуатации
- Анизотропия механических, теплофизических и других свойств
- Образование трещин в прослойках связующего между волокнами
- Относительно низкий модуль упругости

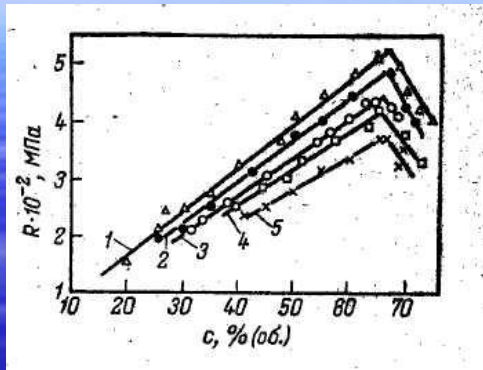
Структура и свойства стеклопластиков

Структура стеклопластиков определяется в основном видом, соотношением размеров армирующих элементов и расположением их в полимерной матрице. Механические характеристики стеклопластиков, в свою очередь, определяются главным образом арматурой. Исследования показывают, что структура оказывает определенное влияние также на теплофизические, светотехнические, радиотехнические, электротехнические и другие свойства композитных материалов. Это относится, прежде всего, к ориентированным стеклопластикам, свойства которых можно широко варьировать изменением структуры за счет изменения, как типа армирующего материала, так и схемы его ориентации.

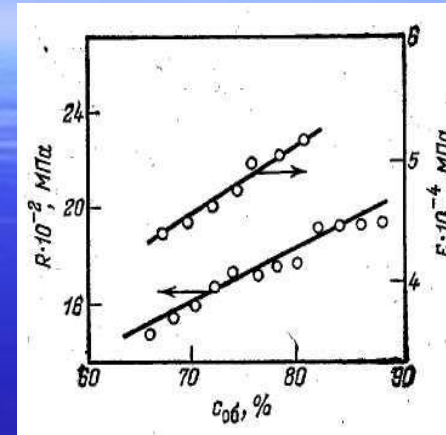
Прочностные свойства стеклопластиков

Марка ткани	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа		Разрушающее напряжение при сжатии, МПа		Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	
	по основе	по утку	по основе	по утку	по основе	по утку
МТБС-6,0	255	261	164	373	298	527
МТБС-5,2	246	249	130	251	132	304
МТБС-4,35	278	334	184	390	292	419
ИТМ	388	304	362	335	483	397

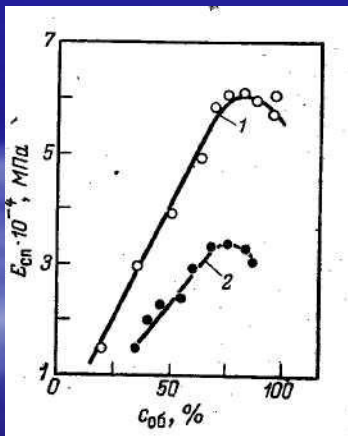
Влияние содержания компонентов



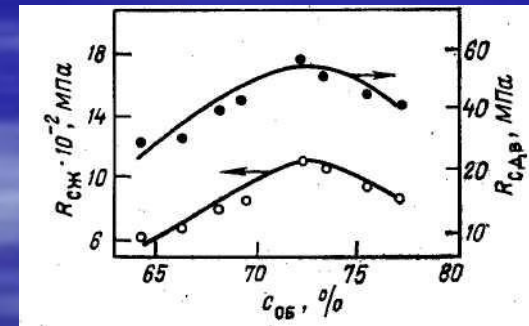
Зависимость разрушающего напряжения при растяжении стеклопластика СВАМ от объемного содержания волокон различного диаметра



Влияние объемного содержания волокна на прочность и модуль упругости при растяжении однонаправленного стеклопластика

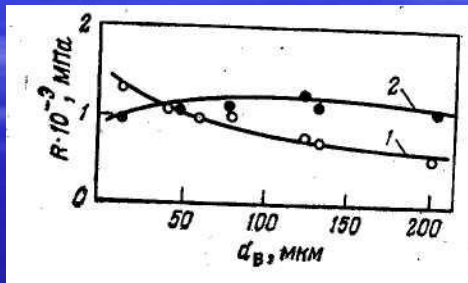


Зависимость модуля упругости от объемной концентрации волокон различного химического состава: 1 - бесщелочного; 2 - щелочного.

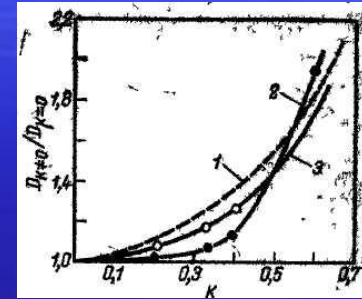


Зависимость прочности стеклопластиков при сжатии и сдвиге от объемного содержания волокна

Влияние геометрических характеристик волокон



Зависимость прочности кольцевых стеклопластиковых образцов при растяжении (1) и сжатии (2) от диаметра волокон



Теоретическая (1) и экспериментальные (2, 3) зависимости отношения жесткостей стеклопластиков равного веса на основе полых и сплошных волокон и плоских (2) и кольцевых (3) образцах от коэффициента капиллярности

Масштабный эффект прочности

Длина рабочей части образца, мм	Число испытаний	Прочность растяжения при σ_x МПа		Среднеквадратическое отклонение $S(\sigma_x)$, МПа		90%-ный доверительный интервал для $\sigma_{x>}$ МПа	Коэффициент вариации, %	
		экспериментальная	расчетная	экспериментальное	расчетное		экспериментальный	расчетный
40	27	58,0	58,0	16,7	14,0	52,5 - 63,5	28,8	24
60	29	50,0	53,0	8,1	11,8	47,5 - 52,5	16,2	22
120	14	46,0	45,0	6,8	8,8	42,5 - 49,5	14,8	19
160	13	40,0	43,0	5,6	8,0	37,0 - 42,5	14,0	18

Физические свойства

- Оптические свойства
- Теплофизические свойства
- Диэлектрические свойства

Применение

- в строительстве
- в электротехнической промышленности
- в авиационной промышленности и ракетно-космической технике
- в судостроении
- в химической, нефтяной и горнодобывающей отраслях
- в производстве товаров народного потребления и спортивного инвентаря

Пресс-материалы

- стекловолокнит (ДСВ)
- гранулированный стекловолокнит (ГСП)
- прессовочный материал (АГ)

Технические характеристики ГСП-8, ГСП -32, ГСП-400

Наименование показателей	Показатели для марок			
	ГСП-8	ГСП -32		ГСП-400
		О	П	
Изгибающее напряжение при разрушении, МПа, не менее	176	100	145	59
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа, не менее	127	100	100	98
Ударная вязкость кДж/м, не менее	65	30	50	20
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10 ⁶ Гц, не более	0,04	0,04	0,04	0,05
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 ⁶ Гц, не более	7	7	8	8
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м, не менее	10 ¹⁰	10 ¹⁰	10 ¹⁰	10 ¹⁰
Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом, не менее	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹²
Электрическая прочность при частоте 50 Гц, МВ/м, не менее	13,0	13,0	13,0	13,0
Массовая доля связующего, %	36+/- 2	36+/-2	36+/-2	36+/- 2
Массовая доля влаги и летучих веществ, %	1,0-3,0	1,0-3,0	1,0-3,0	1,0-3,0
Стойкость к горению	ПВ-О	ПВ-О	ПВ-О	ПВ-О
Коэффициент дымообразования				
— в режиме горения	21-39	21-39	21-39	21-39
— в режиме тления	61-81	61-81	61-81	61-81

Техническая характеристика прессматериала марки АГ-4

Наименование показателя	Показатели для марок	
	АГ-4С	АГ-4НС
Изгибающее напряжение при разрушении, МПа, не менее	465	465
Ударная вязкость, кДж/м, не менее	255	255
Прочность при разрыве, МПа	539	539
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа, не менее: - в направлении ориентации стеклонитей - в направлении перпендикулярном ориентации стеклонитей	255 80	196 49
Электрическая прочность при частоте 50 Гц, кВ/мм, не менее	16.0	14.0
Диэлектрическая проницаемость, при частоте 106 Гц, не более	7	7
Удельное объемное сопротивление, Ом м, не менее	10^{11}	10^{11}
Удельное поверхностное сопротивление, Ом, не менее	10^{12}	10^{12}
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 106 Гц, не более	0.04	0.04
Массовая доля влаги и летучих, %	от 2 до 5	от 2 до 5
Массовая доля связующего, %	от 28 до 32	от 28 до 32

Премиксы

Свойства типичного премикса (полиэфирная смола и рубленое стекловолокно)

Свойство	Значение
Плотность, г/см ³	1,70-1,8
Ударная вязкость, кДж/м ²	15-30
Прочность, кгс/см ² при растяжении	200-400
при статическом изгибе	700-1000
Теплостойкость по Мартенсу, С	120-180
Диэлектрическая проницаемость при 1 МГц	4,2-6,2
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом×м	10 ¹³ -10 ¹⁴
Тангенс угла диэлектрических потерь при 1 МГц	0,02-0,03

Премиксы используют для изготовления конструкционных и электротехнических изделий, деталей холодильного оборудования и кондиционеров, изолирующие конструкции воздушных линий электропередач, уплотнений обмоток крупных турбогенераторов, корпуса приборов и светильников, телефонные трубки, розетки, изоляторы и др.

Боропластики

Основные свойства однонаправленных бороэпоксидных слоистых ластиков

Свойства	Значение при T 23°C	Значение при T 177°C
Предел прочности, МПа		
при продольном растяжении	1323	1082
при поперечном растяжении	72	41
при продольном сжатии	2432	799
при поперечном сжатии	276	76
при сдвиге в плоскости слоя	105	38
при межслоевом сдвиге	90	48
Пределная деформация, %		
при продольном растяжении	6,55	0,76
при поперечном растяжении	0,40	0,76
Модуль упругости, ГПа		
при продольном растяжении	207	206
при поперечном растяжении	19	7,9
при продольном сжатии	207	206
при поперечном сжатии	19	79
при сдвиге в плоскости слоя	4,8	2,2
Коэффициент Пуассона:		
продольный	0,21	0,21
поперечный	0,019	0,008
Плотность, кг/м ³	2007	2007
Температурный коэффициент линейного расширения 10 ⁻⁶ /C		
продольный	4,14	5,38
поперечный	19,2	35,4

Основные свойства слоёв с ориентацией 45 в боропластике

Свойства	Значение при T 23°C	Значение при T 177°C
Предел прочности, МПа		
при продольном растяжении	200	76
при поперечном растяжении	200	76
при продольном сжатии	207	76
при поперечном сжатии	207	76
при сдвиге в плоскости слоя	331	411
Пределная деформация, %		
при продольном	2,6	5,0
при поперечном	2,6	5,0
Модуль упругости, ГПа		
при продольном растяжении	18	8,0
при поперечном растяжении	18	8,0
при продольном сжатии	18	8,0
при поперечном сжатии	18	8,0
при сдвиге в плоскости слоя	55	53
Коэффициент Пуассона:		
продольный	0,848	0,927
поперечный	0,848	0,927
Плотность, кг/м	2007	2007
Температурный коэффициент линейного расширения $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$		
продольный	5,55	6,76
поперечный	5,55	6,76

Свойства однонаправленного композита типа 81С - эпоксидное связующее

Свойства	Значения при T=23С	Значения при T=177С
Изгиб в продольном направлении		
Предел прочности, МПа	2274	1468
Модуль упругости, ГПа	211	176
Изгиб в поперечном направлении		
Предел прочности, МПа	126	779
Модуль упругости, ГПа	21,1	8,3
Предел прочности при сдвиге в плоскости слоя, МПа	119	62,7
Растяжение в поперечном направлении		
Предел прочности, МПа	75,8	-
Модуль упругости, ГПа	21,4	-
Деформация разрушения, %	0,48	-
Плотность кг/м ³	2210	-
<i>Характеристики препрега</i>	1	-
Массовая доля, %		
Связующего	26	-
Летучих	1	-
Липкость при 33 С	Хорошая	-
Число фламентов по ширине ленты, м ⁻¹	5500	

Применение борных волокон и композитов из них

Изделие	Двигатель или узел (фирма) <i>Выпускаются</i>	Композит
F-14	Горизонтальные стабилизаторы	Эпоксидоропластики
F-15	Хвостовое оперение, пол, стабилизатор	Эпоксидоропластики
Вертолёт «Утгас»	Усиливающая балка	Эпоксидоропластики
F-11	Крепление крыльев	Эпоксидоропластики
«Мираж 2000»	Рули	Эпоксидорографит
«Шаттл»	Фюзеляж	Бороалюминовые трубы
Удилища для рыбной ловли	«Браунинг», «Шейкспиар», «Родон»	
Теннисные ракетки	«Сполдинг», «Дьюра-файбер», «Браунинг»	
Клюшки для гольфа	«Алдилла»	
F-14	Крылья и обтекатели	Борные и др. волокна с эпоксидным связующим
A-7	Консоль крыла	Борографит и эпоксидное связующее
C-130	Кессон крыла	Эпоксидоропластик, усиленный алюминием
P-4	Рули	Эпоксидоропластик
«Боинг»	Предкрылок	Эпоксидоропластик
P-100	Лопасты вентилятора	Бороалюминовый КМ
C-5A	Предкрылок	Эпоксидоропластик
CR-54	Стрингеры фюзеляжа, хвостовой костыль	Эпоксидоропластик
«АквоЯ210»	Трубы велосипедной рамы	Бороалюминовый КМ

Органопластики

Свойства терморезистивных органопластиков указанного состава

Показатель	Арамидное волокно и эпоксидная смола			Поливинилпиртовое волокно и феноло-формальд. смола	Полиамидное, полиэфирное или полиакрилонит-рильное волокно и феноло-формальд. смола	
	нить*, жгут	ткань*	рубленое волокно	ткань	ткань	мат, бумага
Плотность, г/см ³	1,25-1,38	1,24-1,33	1,32	1,2-1,3	1,15-1,3	1,2-1,3
Прочность, МПа						
при растяжении	1500-2500	500-700	200	200-300	100-200	70-80
при изгибе	500-700	300-400	250	160-250	100-180	110-130
при сжатии	200-300	150-250	-	110	75	140-150
Модуль упругости при растяжении, ГПа	50-90	28-35	20	11-15	2,5- 8	
Относит. удлинение, %	1,7-2,2	1,7-2,4	-	3-8	10-20	-
Ударная вязкость, кДж/м ²	315	-	-		500-600	16-35

Свойства термопластичных органопластиков указанного состава

Показатель	Полиамид-6,8 + рубленое арамидное волокно	Полиамид-6,8 + ткань из арамидных волокон	Полиэтилен + рубленое поли- винилспиртов ое волокно	Полиэтилен- терефталат+ +ткань из полиэтилен- терефталатного волокна	Фторопласт ++ + ткань из полиэтилен- терефталат-ного волокна
Плотность г/см ³	1,10	1,10-1,20	0,98	1,20	1,76
Прочность, МПа					
при растяжении	130-150	450-550	78	140	90
при изгибе	140	450	60	-	60
Модуль упругости при растяжении	11	36	3,2	5	3,2
Ударная вязкость, кДж/м ²	26	120	40	-	

Применение

- в авиа- и космической технике
- авто- и судостроении
- машиностроении для изготовления элементов конструкций, пулезащитной брони, радиопрозрачного материала
- в электро-, радио- и электронной технике - для обмотки роторов электродвигателей, производства электронных плат с регулируемой жесткостью и высокой стабильностью размеров
- в хим. машиностроении - для произ-ва трубопроводов, емкостей; для произ-ва спортивного инвентаря и в др. отраслях промышленности

Углепластики

Показатель	Углепластики на основе эпоксидного и полиамидного связующих с ориентир. нитями, жгутами, лентами	
	однонаправленные*	перекрестные 1:1*
Плотн., г/см ³	1,45-1,50	1,4-1,5
Прочность, МПа		
при растяжении	800-1700	500-900
при изгибе	1000-2000	800-1200
при сжатии	700-1200	500-800
Модуль упругости, ГПа	120-150	65-85

Применение

- детали самолетов и космических аппаратов
- в аэрокосмической промышленности
- в медицине
- в автомобилестроении
- клюшки для игры в гольф
- удилища.
- теннисные ракетки

Гибридные композиты

Основных типов гибридных композитов

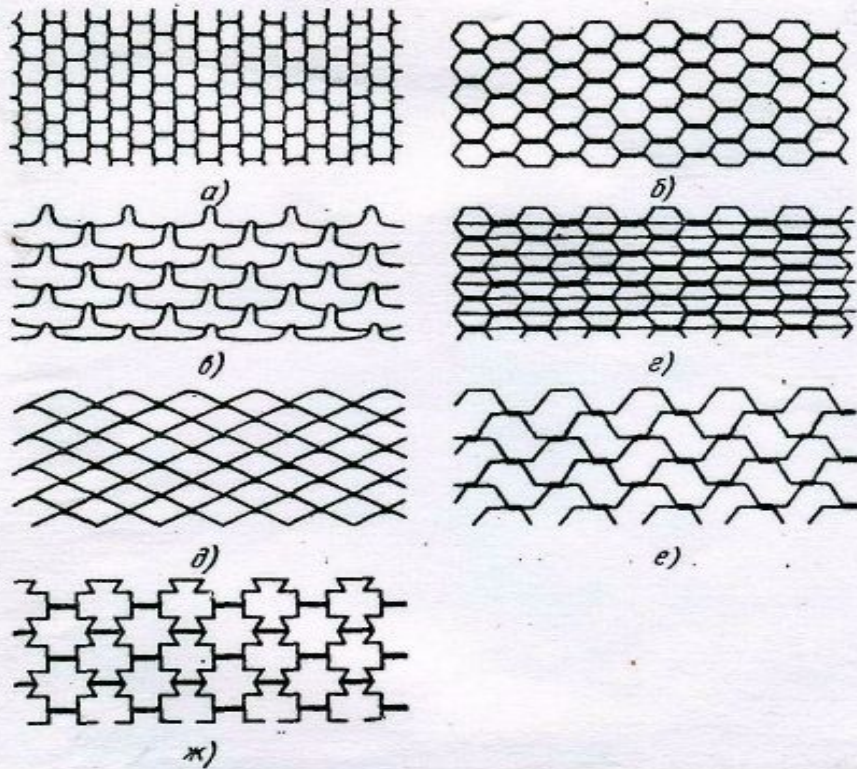
- Усредненный
- Внутрислоевой
- Межслоевой
- Отдельные усилительные элементы
- Супергибриды

Примеры и области применения гибридных композитов

- Многослойные макронеоднородные гибридные полимерные композиционные материалы - для изготовления корпусов и корпусных конструкций скоростных судов и наземных транспортных средств
- Лента углеродная нагревательная гибкая ЛУНГ - для подогрева трубопроводов, технологического оборудования, насосов, емкостей шнеков и др.
- Модуль газоотводящего ствола МГС - для создания на его основе газоотводящих стволов дымовых труб ТЭЦ, котельных, а также газоходов для высокоагрессивных газовых смесей, образуемых в химических и металлургических производствах.

Сотопласты

Формы ячеек сотовых заполнителей



а – прямоугольная;

б – гексагональная;

в – флекскор;

г – гексагональная с
усиливающими
элементами;

д – ромбовидная;

е – гексагональная
смещенная;

ж – мальтийский крест.

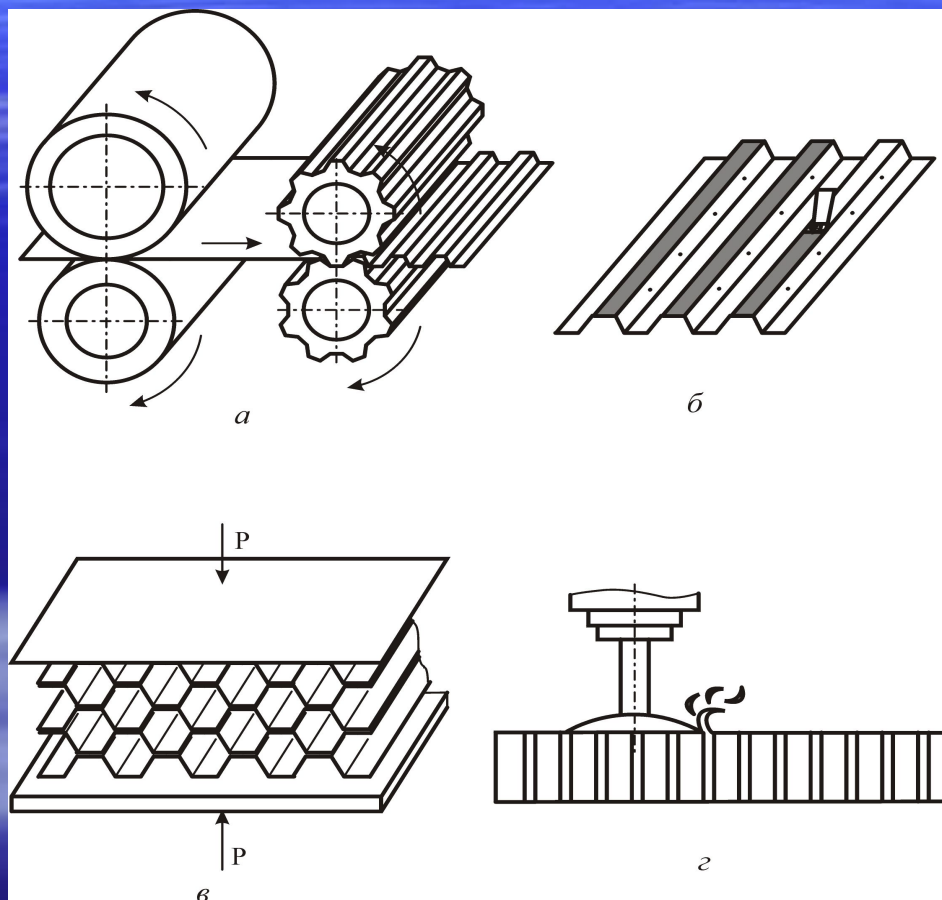
Физико-механические свойства сотофенопластов

Свойства	Х/б ткань		Крафт бумага		Асбестовая бумага
	I	II	I	II	
Размер сот, мм	11,1	11,1	11, 1	11,1	11,1
Объемный вес, г/см ³	0,06	0,14	0,0 6	0,0, 9	0,07
Предел прочности, г/см ² при сжатии	16,5	71,7	17, 6	52,0	24,6
при сдвиге	8,1	32,2	9,7	15,2	10,9
Модуль упругости при сдвиге, кгс/мм ²	427, 0	116 9,0	53 9,0	126 0,0	770,0

Методы изготовления сотопластов

- сборкой профилированных листов;
- растяжением склеенного пакета;
- гофрированием пакета;
- объемным ткачеством;
- экструзией.

Сборка сот из профилированных ЛИСТОВ



а - профилирование материала;

б - нанесение клея на склеиваемые поверхности и сушка;

в - сборка блока по сборочным отверстиям, запрессовка и склеивание в печи;

г - обработка наполнителя для получения нужной формы