

МИРЭА - Российский технологический университет
Институт тонких химических технологий
имени М. В. Ломоносова

КАФЕДРА
ХИМИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС
и ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ
(ХТПП и ПК)



Бакалавриат (академический)

Направление подготовки:

18.03.01 «Химическая технология»

Профиль: «Технология и переработка полимеров»

Дисциплина:

Б1.В.ДВ.10.3 «Принципы создания полимерных композиционных материалов»

Лектор:

доктор технических наук, профессор

Симонов-Емельянов Игорь Дмитриевич

Лекция 7

**Армированные пластики,
волокна, полимерные матрицы,
основные параметры и модель
структуры**

**доктор технических наук,
профессор
И. Д. Симонов-Емельянов**

Современная авиационная техника – самолеты типа «Стелс»

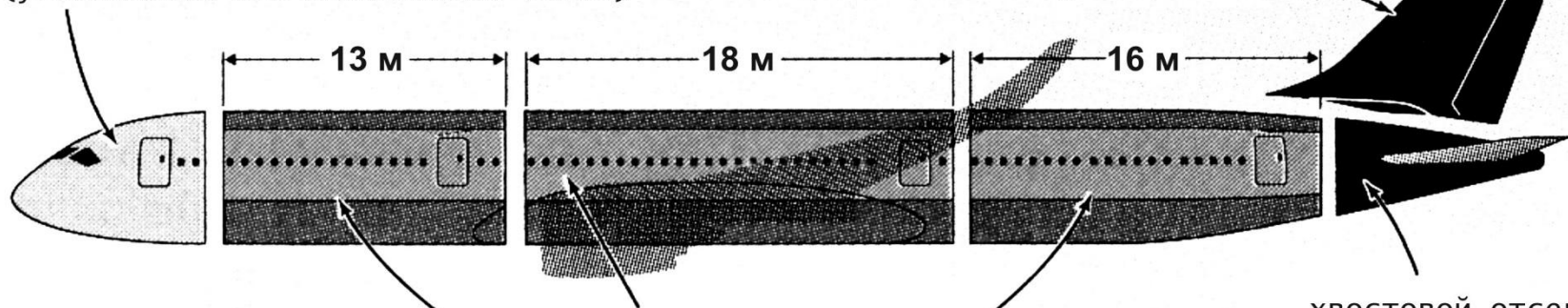


Конструкции из АрПКМ в авиастроении

Компоновка конструкции самолета A350 XWB

носовой отсек
(углепластик или алюминиевый сплав)

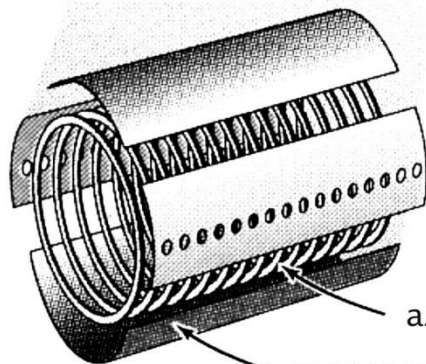
киль (углепластик)



секции фюзеляжа (углепластиковые панели оболочки, стыки и стрингеры, но алюминиевые шпангоуты)

хвостовой отсек
(углепластик, одна секция)

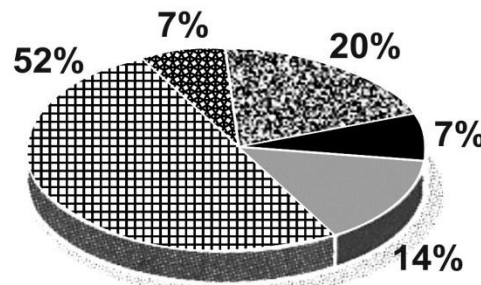
Концепция
четырех оболочек
наружного слоя



алюминиевые шпангоуты

углепластиковые панели оболочки

Распределение материалов в конструкции
самолета A350 XWB

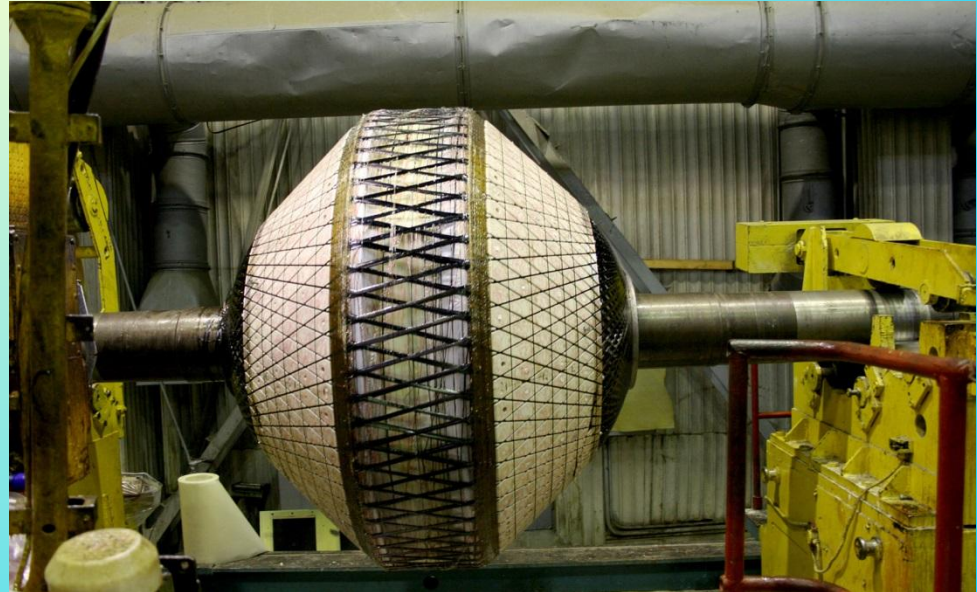
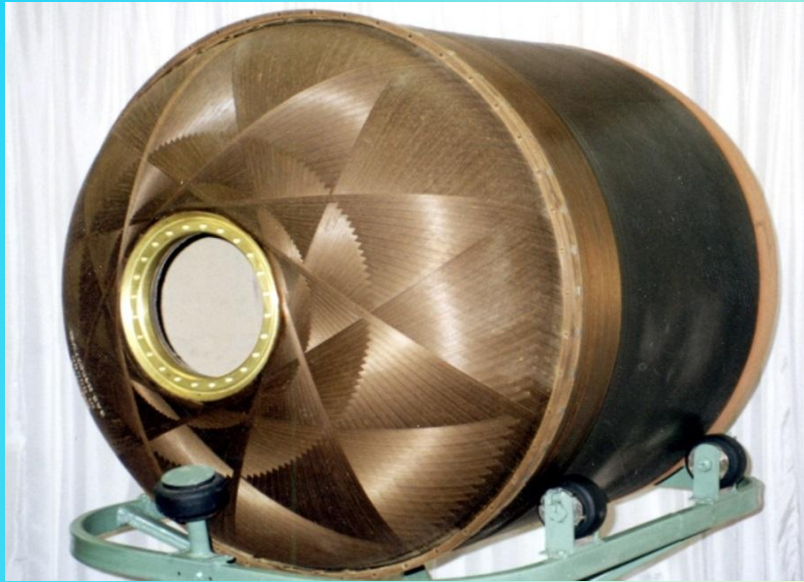


- алюминиевые/алюминий-литиевые сплавы
- сталь
- титановые сплавы
- полимерные композиционные материалы
- прочие материалы

Современная техника морского флота – корабли типа «Стелс»



Армированные пластики (АрПКМ) и методы получения высоконагруженных изделий



Структура и свойства АрПКМ

Состав, структура и ее параметры определяют свойства АрПКМ

Модель структуры АрПКМ

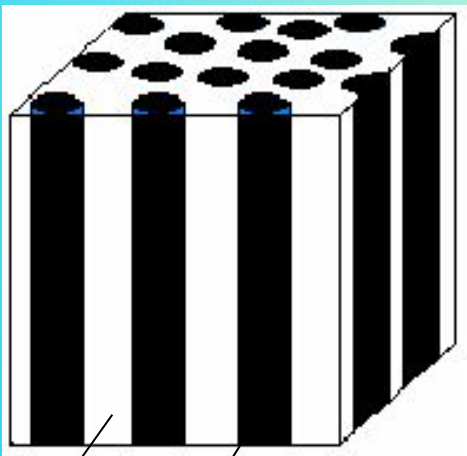
Модель структуры АрПКМ включает рассмотрение:

- **геометрических параметров**, определяемых геометрией, размерами армирующих волокон, их распределением и упаковкой в объеме полимерной матрицы;
- **физико-химических параметров**, зависящих от взаимодействия на границе раздела, приводимых в молекулярный контакт исходных фаз и образования граничных (межфазных) слоев;
- **обобщенных параметров**, характеризующих структуру АрПКМ при условии сохранения сплошности (монолитности) армированного материала: $\varphi_{св} + \varphi_f = 1$

Армированная структура АрПКМ (Тип структуры II)

Структура,
армированная
в 1-ом направлении
(по оси X – X)

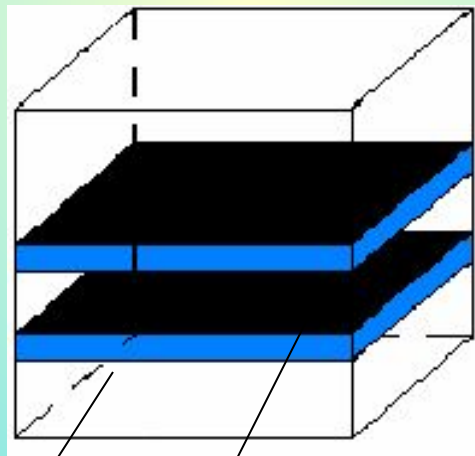
$$l_x \gg l_y \approx l_z \quad \sigma_x \gg \sigma_y \approx \sigma_z$$



Полимерная
матрица Армирующий
компонент - волокно

Структура,
армированная
в 2-х направлениях
(по оси Y – Z)

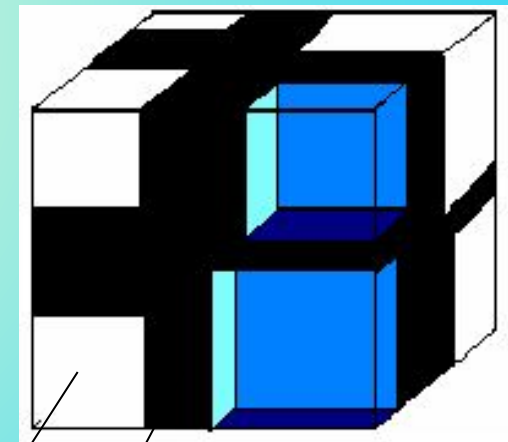
$$l_x \approx l_y \gg l_z \quad \sigma_x \approx \sigma_y \gg \sigma_z$$



Полимерная
матрица Армирующий компонент
– листовой структуры

Структура,
армированная
в 3-х направлениях
(по осям X – Y – Z)

$$l_x \neq l_y \neq l_z \quad \sigma_x \neq \sigma_y \neq \sigma_z$$



Полимерная
матрица Армирующий компонент-
объемной структуры

Классификация ПКМ по типу микро- и макроструктуры

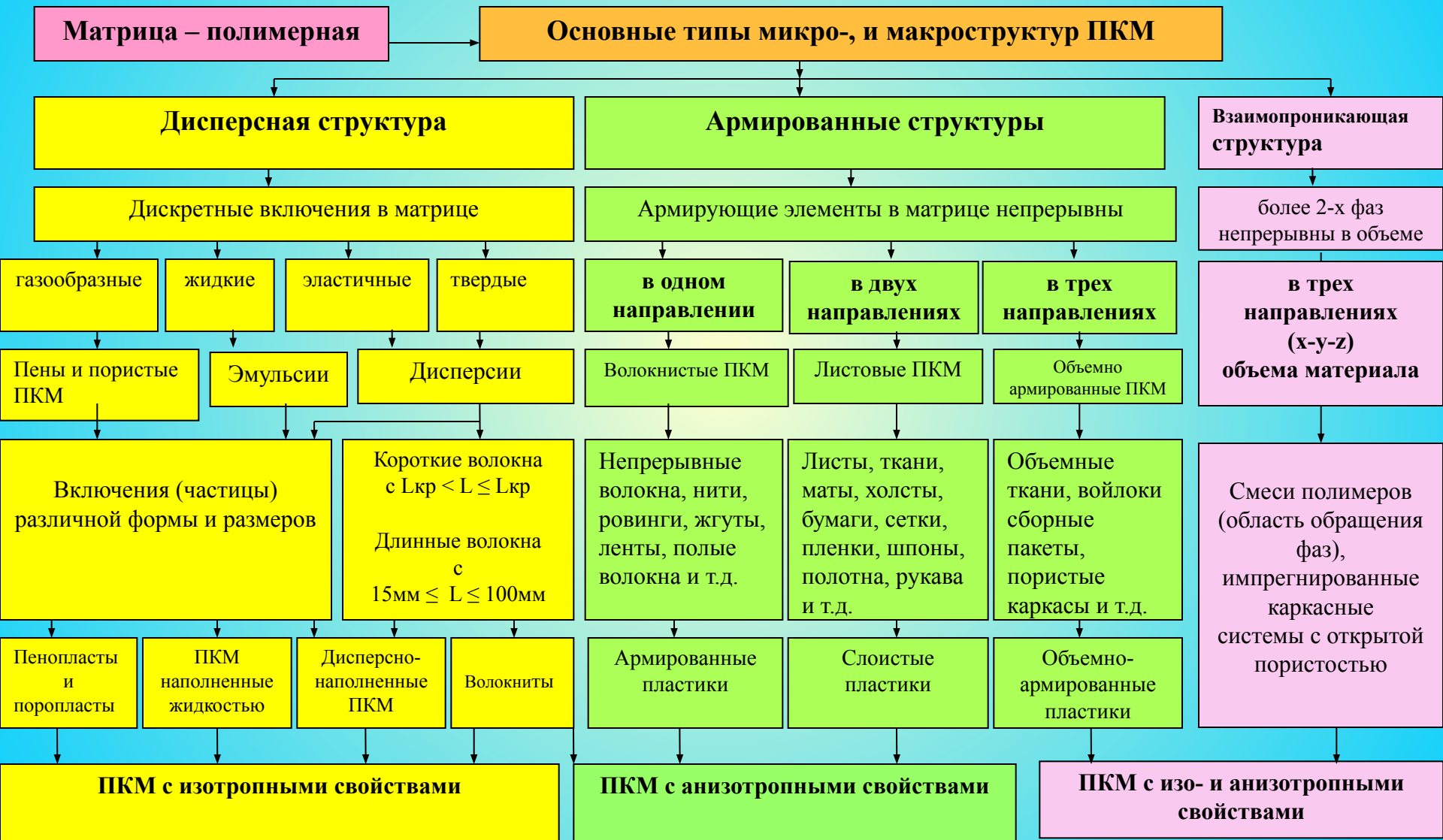
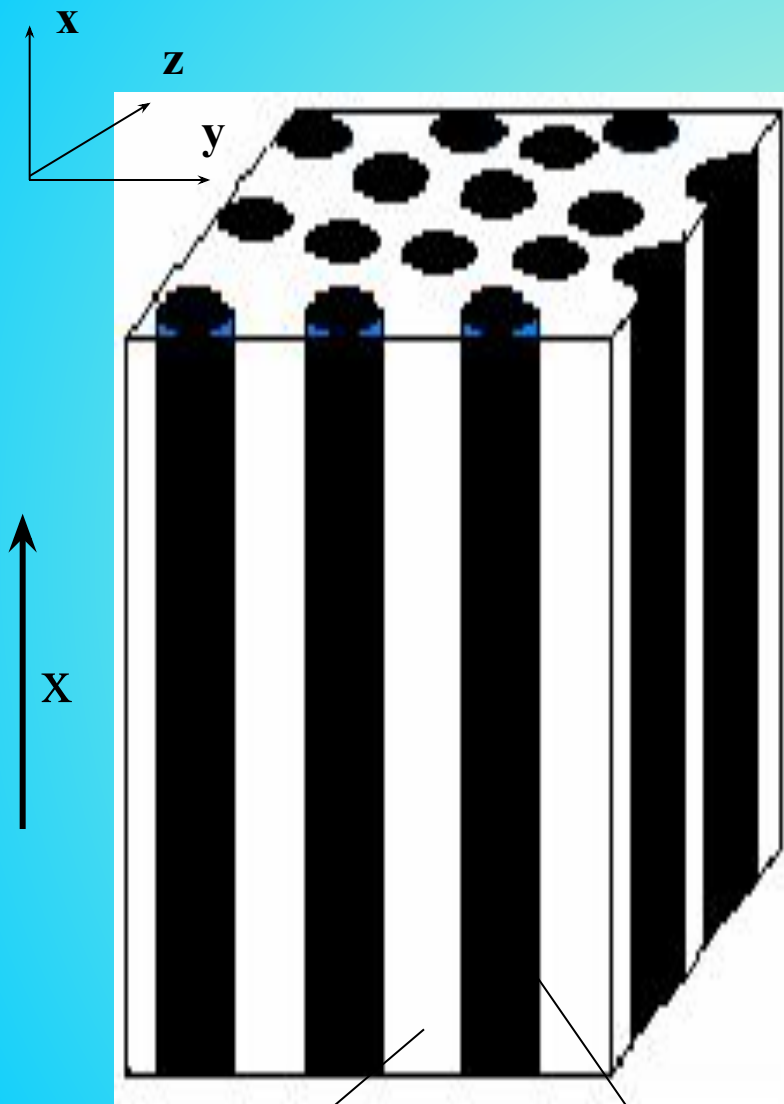
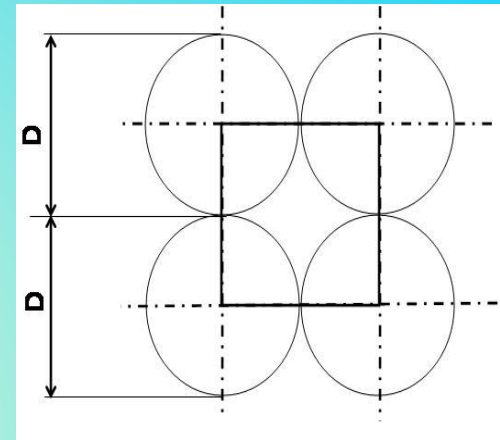
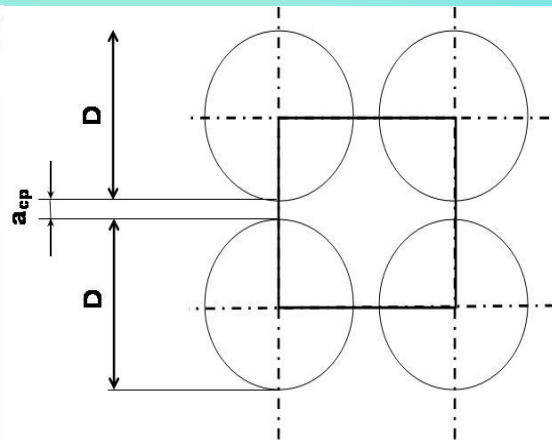


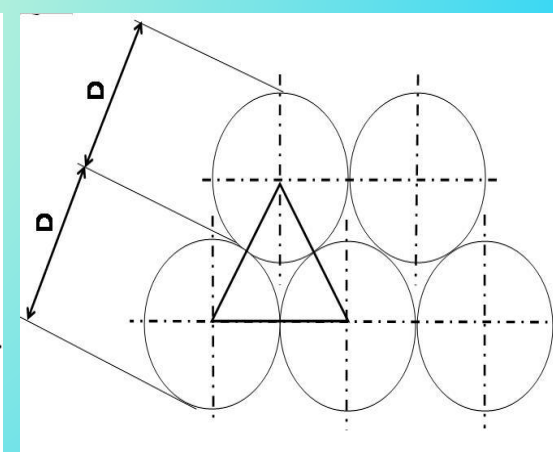
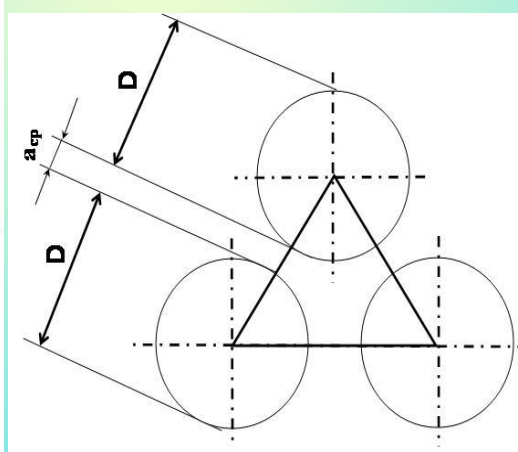
Схема армированных полимерных систем в 1-ом направлении по оси X-X



Кубическая упаковка волокон – $\varphi_{m,f} = 0,785$ об. д.



Гексагональная упаковка волокон - $\varphi_{m,f} = 0,906$ об. д.



Полимерная матрица

Армирующее волокно

Волокнистые компоненты для создания армированных полимерных композиционных материалов (АрПКМ)

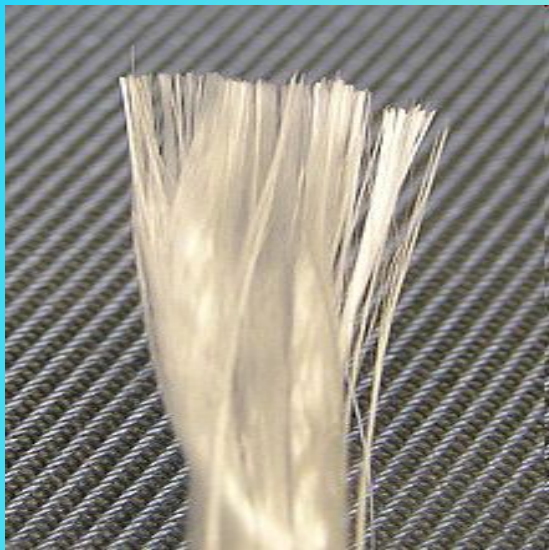


Рис. Стекловолоконное волокно



Рис. Бобина с углеродным волокном



Рис. Базальтовое волокно



Рис. Углеродная ткань



Рис. Объемная ткань



Рис. Объемная ткань

Свойства углеродных волокон (УВ)

Классификация углеродных волокон по физико-механическим характеристикам:

- **Высокопрочные** $\sigma_f \approx 3000 \text{ МПа}$
- **Сверхвысокопрочные** $\sigma_f \approx 5000 \text{ МПа}$
- **Низкомодульные** $E_f \leq 100 \text{ ГПа}$
- **Среднемодульные** $E_f \approx 200 - 320 \text{ ГПа}$
- **Высокомодульные** $E_f \geq 350 \text{ ГПа}$
- **Ультравысокомодульные** $E_f \geq 450 \text{ ГПа}$

Свойства современных углеродных суперволокон:

- Прочность при растяжении - 7200 МПа (Япония, фирма «Торрей»);
- Модуль упругости при растяжении – 895 ГПа (США, P120)

Таблица свойств современных углеродных волокон (УВ)

Марка УВ, страна	Плотность, кг/м ³	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Исходное сырье
Россия					
Урал-24	1750	1900	175	1,1	ГГЦ
ВМН-5	1750	2900	450	0,7	ПАН
УКН-П	1750	4500	240	-	ПАН
Кулон	1950	3300	600	0,4	ПАН
США					
T-300	1750	3200	240	1,5	ПАН
IMT	1800	4700	280	1,8	ПАН
P 120	2200	2200	820	0,3	Пек
Япония					
T 300j	17800	4200	230	1,8	ПАН
T1000	1800	7200	300	1,9	ПАН
M 60j	1940	3800	590	0,7	ПАН

Таблица свойств современных стеклянных и базальтовых волокон

Стеклянные волокна	Плотность, кг/м ³	Температура размягчения, °С	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости, ГПа	Относительное удлинение при разрыве, %
Кварцевое	2650	1670	3500	75	3,0
Алюмосиликатное марки Е	2500	845	2400-3700	100	4,8
Магнийалюмосиликатное высокопрочное	2580	970	5000-6000	84	4,8
Магнийалюмосиликатное высокомодульное	2520	980	3500-5800	95	4,8
Стекловолокно марки S (США)	2490	600	4700	86	5,4
Стекловолокно марки ВПМ (Россия)	2560	700	4500	95	5,0
Стекловолокно марки Т (Япония)	2490	680	4400	86	5,5
Стекловолокно марки УП (Россия)	2470	680	5000	85	5,5
Базальтовое	2750	700	2200-2500	85-100	3-5

Таблица свойств современных полимерных волокон (ПВ)

Полимерные волокна	Плотность, кг/м ³	Температура, °С	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости, ГПа	Относительное удлинение при разрыве, %
ПЭ (ВНИИСВ)	970	120	2000-3500	90	3-6
ПЭ (Spektra, США)	970	120	2900	150	3,1
Текмилон, Япония	970	120	3400	90	5,0
ПП	900	150	500	5	30
Арамидные					
СВМ	14300	300	3800-4200	135	3,4
Армос	1430-	300	3800-4200	145-160	3,2
Терлон	1340-1450	350	3000-3800	140-185	2,6-3,0
Русар С-600	1450	350	5500	160	3,0
Русар НТ	1450	350	6100	170-180	2,0
Кевлар (США)					
Кевлар 29	1440	280	3000-3200	62-70	3,3
Кевлар 49	1450	350	3800	135	2,3-2,6
Кевлар 149	1470	350	2400-3200	160-184	1,4-1,5
Кевлар М	1450	350	4100	121	1,45

Таблица свойств современных волокон

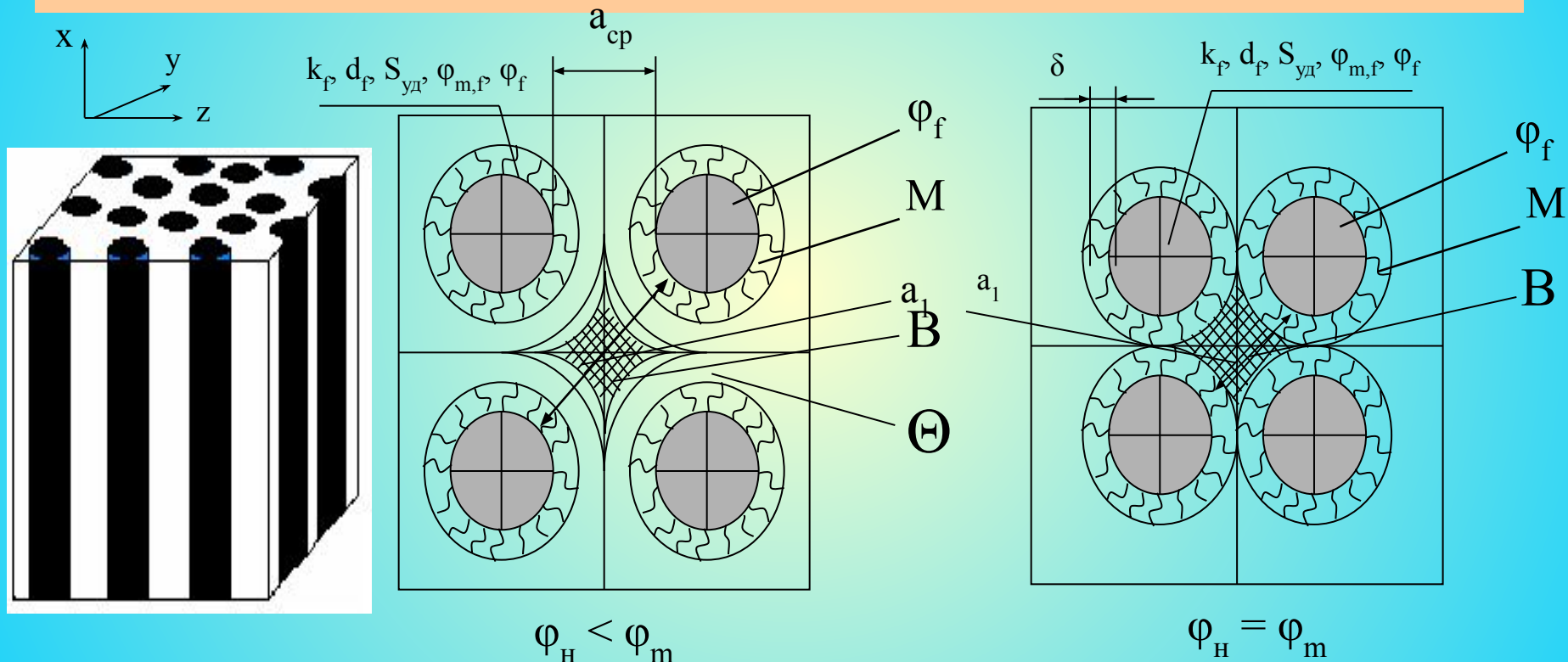
Тип волокна	Плотность	Прочность	Модуль Юнга	Удлинение	Теплопроводность	КЛТР $\times 10^5$	T пл/разл
	ρ , кг/м ³	σ , МПа	E, ГПа	ϵ , %	, Вт/(м К)	1/°C	°C
Стекловолокно							
Тип E	2540	3500	785	4,8	0,74	4,9	840
Тип S	2490	5400	890	3,5	0,9	2,9	970
Кварцевое волокно	2210	6000	738	-	1,8	0,55	1670
Борное волокно	2600	2005-3800	385	0,6	25-40	2,6	2200
Углеродное волокно:							
Высокопрочное	1800	7200	300	2,4	21	1,0	>1000
Высокомодульное	1950	3200	785	0,4	40	0,8	>1000
Карбидное волокно	3500	4000	420	0,2	-	-	1800
Полимерные волокна:							
ПЭ	970	2000-3500	50	3 - 6	0,3-0,4	10-20	100
ПП	900	500	5	30	0,2	10	155
Ароматические полиамидные волокна:							
СВМ, Терлон	1,44	3500-4500	125-175	3 - 5	0,43	2	270
Кевлар 149	1,45	2400	180	3,5	0,48	2	250

Характеристики терморезистивных и термопластичных полимерных матриц для АрПКМ

Характеристика	Полиэфирная	Эпоксидная	Фенольная	Кремний-органическая	ПИ	ПСФ	ПЭК
Плотность, 10^{-3} кг/м ³	1,1-1,46	1,1-1,4	1,2-1,4	1,15-1,36	1,4-1,43	1,2-1,4	1,15-1,3
Разрушающее напряжение при растяжении (МПа):	23,5-68,5	27,4-140	22,5-80,0	6,8-34,2	40-140	55-70	50-100
сжатии	79,3-250	85-280	68-205	49-100	-	-	-
изгибе	10,8-127	59-157	45-120	6,8-95	58	90	90
Модуль упругости при растяжении, ГПа	1,5-4,5	1,9-4,9	2,1-6,8	1,5-3,7	3,2-5,6	2,5-3,5	3,8
Относительное удлинение при разрыве, %	3,7-6,0	1,2-6,5	0,4-3,0	0,3-1,5	80-150	50-100	50-100
Ударная вязкость, кДж/м ²	5,9-10,7	2,9-24,5	2,4-11,3	2,3-5,4	50-100	100-110	50-100
Теплостойкость, по Мартенсу, °С	84-110	110-160	120-180	250-280	250-280	160-200	250
Усадка, %	4-15	0,5-5,0	0,9-7,0	2,1-4,3	0,5-1,5	0,7-1,0	1,0-1,5

Строение структуры АрПКМ

Модель структуры сечения АрПКМ в плоскости Y-Z (вид сверху)



a_{cp} — среднестатистическое расстояние между волокнами;

a_{cp}/d - отношение среднестатистического расстояния между волокнами к их диаметру;

Θ — доля полимерной матрицы для формирования прослойки между волокнами;

B — доля полимерной матрицы для заполнения объема между волокнами с прослойками;

M — доля полимерной матрицы в граничном слое.

Основные параметры волокон для создания АрПКМ

● форма сечения волокна (круг, квадрат, треугольник, прямоугольник, ромб и др.

● размеры волокна – диаметр – d_f (или эквивалентный диаметр – $d_{эк}$), длина - L_f ;

● критическая длина волокна ($L_{кр}$);

● упаковка волокна, максимальная доля волокна в АрПКМ – $\varphi_{m,f}$;

● плотность волокна: истинная – ρ_f , кажущаяся – $\rho_{f,каж}$ и насыпная – $\rho_{f,нас}$;

● пористость волокна (суммарный объем пор – $V_{п}$, размер пор - r), шероховатость - R_a ;

● удельная поверхность волокна – $S_{f,уд}$ (общая – $S_{f,об}$, внутренняя – $S_{f,вн}$ и геометрическая – $S_{f,г}$);

● специальные характеристики, необходимые для получения требуемых свойств АрПКМ

Определение параметра $\Phi_{m,f}$ по кривой уплотнения или намотки жестких волокон

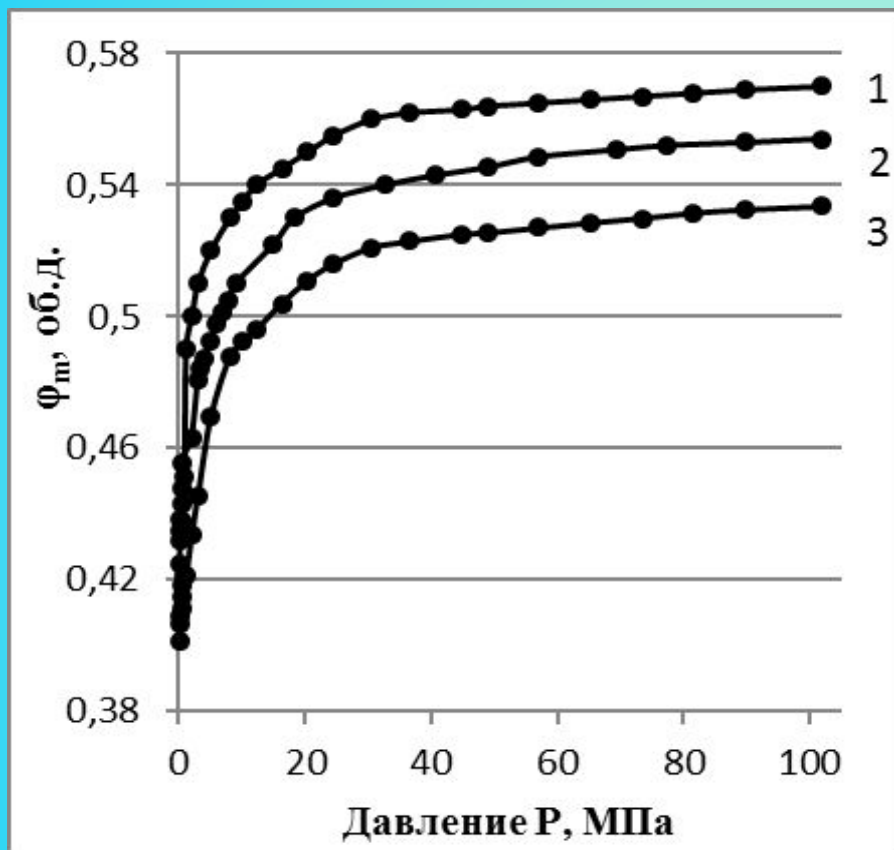


Рис. Зависимость $\Phi_{f,m}$ пакета углеродных волокон с различным количеством элементарных волокон в нити:

1 – 3000 шт., 2 – 6000 шт. и 3 – 12000 шт.
от давления уплотнения.

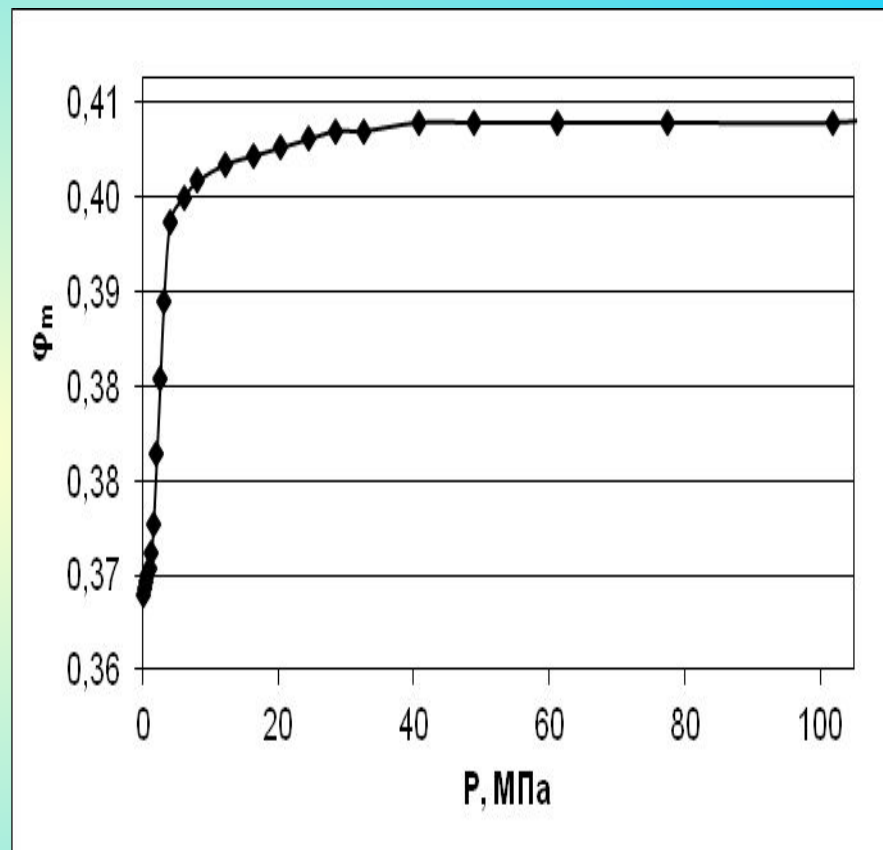


Рис. Зависимость $\Phi_{f,m}$ для пакета стеклянных волокон от давления уплотнения.

Определение параметра $\Phi_{m,f}$ по кривой уплотнения или намотки арамидных волокон

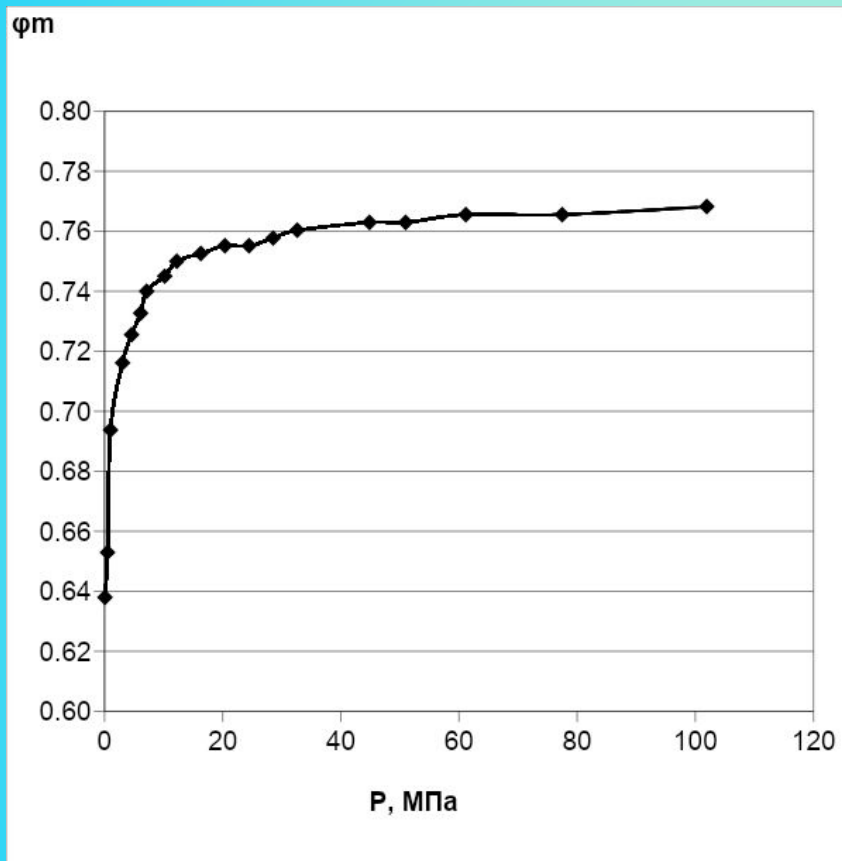


Рис. Зависимость $\Phi_{m,f}$ для арамидного волокна Русар-НТ от давления уплотнения.

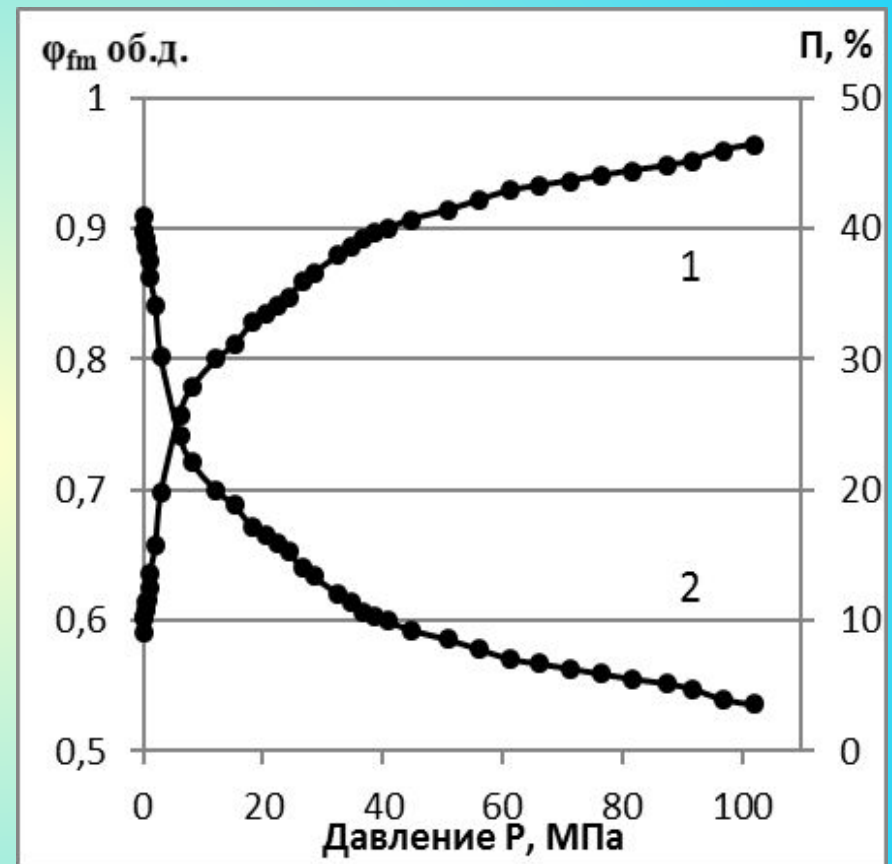


Рис. Зависимость $\Phi_{m,f}$ (1) и пористости (2) для пакета из арамидного волокна марки Русар-С-600 от давления уплотнения.

Структура граничных (межфазных) слоев в АрПКМ – волокно -полимер

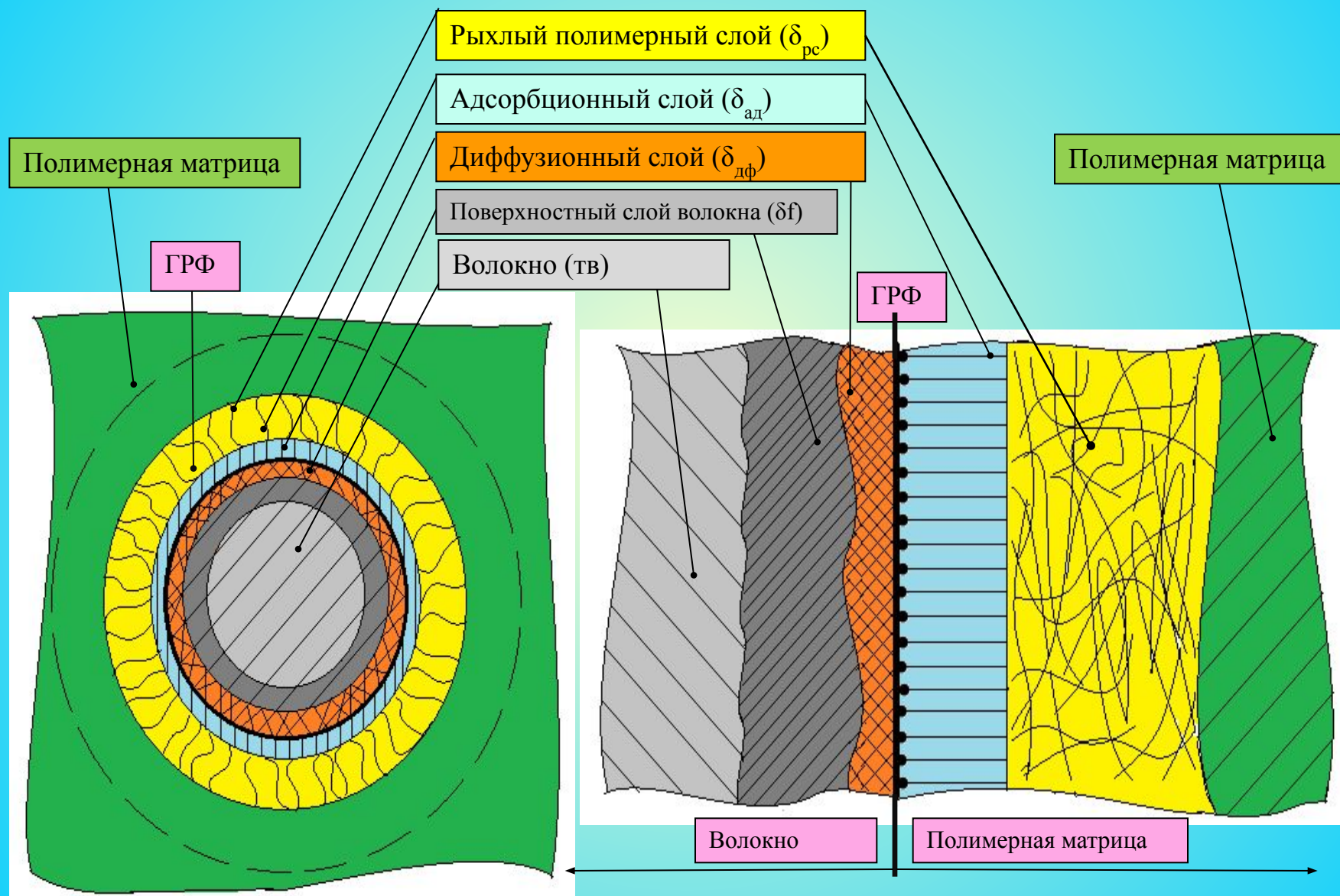


Схема 1 – Структура граничных слоев в системе полимер – волокно

Классификация АрПКМ 1D-структуры по геометрическому обобщенному параметру

$$a_{\text{cp}} / d$$



Обобщенные параметры структуры АрПКМ (1D – структура)

Обобщенные параметры структуры АрПКМ - это параметры для расчета, которых используют несколько основных параметров

Обобщенные параметры структуры АрПКМ:

- - $a_{cp,f}$ – среднестатистическое расстояние между волокнами:

$$a_{cp,f} = d [(\varphi_{m,f} / \varphi_f)^{1/2} - 1];$$

- - отношение - $a_{cp,f} / d = [(\varphi_{m,f} / \varphi_f)^{1/2} - 1];$

- - параметр $\Theta = (\varphi_{m,f} - f^2 \varphi_f) \varphi_m$; где: $f^2 = (1 + 2\delta/d)$;

- - параметр $B = [(1 - \varphi_{m,f}) / \varphi_{m,f}] \varphi_f$

- - параметр $M = (f^2 - 1) \varphi_f$

Условие монолитности АрПКМ: $\varphi_f + \varphi_n = 1$ и

при $\varphi_f = \varphi_{m,f}$ - $\varphi_{m,f} + \varphi_n = 1$

при $\varphi_f < \varphi_{m,f}$ - $(1 - \varphi_{m,f}) + (\varphi_{m,f} - \varphi_f) + \varphi_n = 0$

СПАСИБО
ЗА
ВНИМАНИЕ

