

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

---

*Кафедра «Технология композиционных материалов, конструкций и микросистем»*

«Разработка модели и исследование напряженно-деформированного  
состояния дискретно армированного стеклопластика на основе  
термопластичной матрицы»

Студент: Гапоненко И.В.  
Руководитель: Салиенко Н. В.

Москва, 2018

**Цель работы:** Разработка модели и исследование деформационно-прочностных свойств стеклопластика на основе термопластичной матрицы, армированной короткими стеклянными волокнами.

**Задачи :**

- Провести анализ литературных данных по материаловедческим основам создания дискретно армированных стеклопластиков. Рассмотреть термопластичные матрицы, стеклянные армирующие волокна, свойства термопластов, армированных короткими волокнами. Описать дефекты и их влияние на физико-механические характеристики стеклопластиков. Проанализировать аналитическое и численное моделирование деформационно-прочностных свойств дискретно-армированных ПКМ.
- Изготовить образцы стеклопластика на основе поликапроамидной матрицы и коротких стеклянных волокон. Провести экспериментальные испытания на растяжение и сдвиг по определению физико-механических свойств стеклопластика.
- Разработать физическую модель структуры ПКМ с дефектом на торцах армирующих волокон. Разработать КЭ-модель такого ПКМ и методик построения модели развития дефекта на границе раздела волокно-матрица в программном комплексе ANSYS.
- Провести анализ результатов аналитического, численного моделирования и экспериментальных данных.

## Раздел 1. Литературный обзор

### 1.1. Материаловедческие основы создания дискретно армированных стеклопластиков

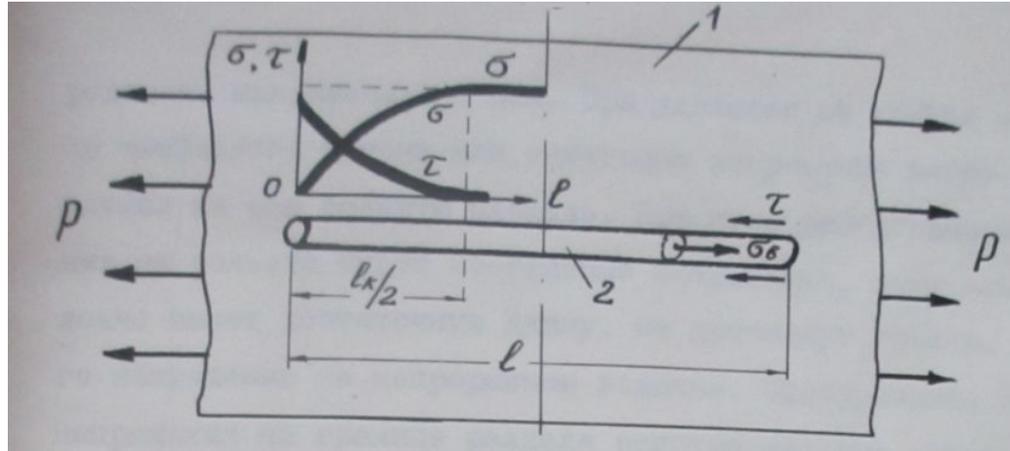


Рис. 1. Схема распределения растягивающих напряжений  $\sigma$  и напряжений сдвига  $\tau$  вдоль короткого волокна, находящегося в матрице.

1 - матрица;

2 - волокно;

P -приложенная нагрузка;

L -длина волокна;

$\sigma_b$  - напряжение при разрыве волокна

$$L_k/d =$$

$$\sigma_b / 2\tau_i$$

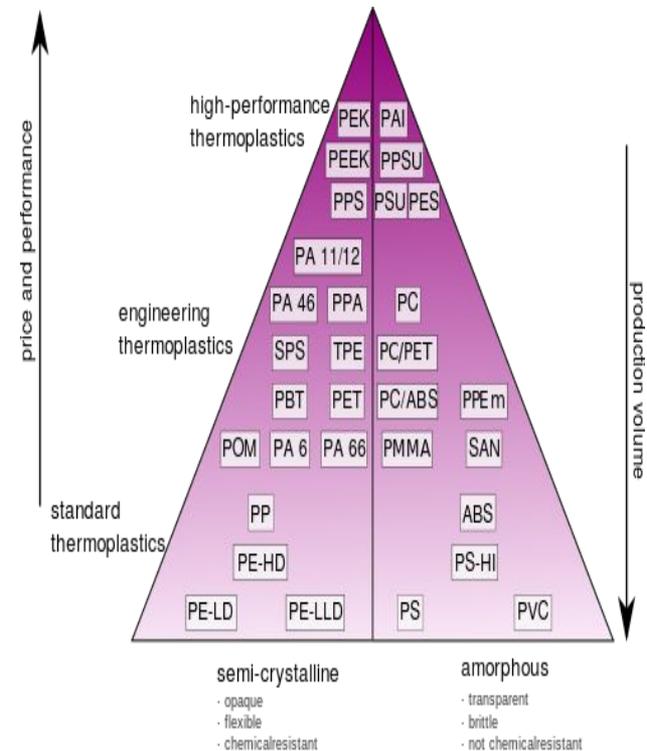
Где  $\tau_i$  - разрушающее напряжение при сдвиге по границе раздела волокно-матрица или по матрице, в зависимости от того какая из этих величин меньше, d-диаметр волокна,  $L_k$ - критическая длина волокна,

### 1.1.1. Термопластичные матрицы

(Продолжение Раздела 1)

Термопластичная матрица в ТПКМ:

- обеспечивает монолитность материала, прочную связь между армирующими элементами и их совместную работу при нагружении;
- лимитирует деформационную теплостойкость и термостойкость материала;
- вносит аддитивный вклад в эксплуатационные свойства материала;
- играет определяющую роль в выборе и реализации метода и условий формования элементов конструкций;
- обладают более низким по сравнению с реактопластами модулем упругости



### 1.1.2. Стекланные армирующие волокна (Продолжение Раздела 1)

Таблица 1. Физико-механические свойства различных волокон

Волокно	Плотность г/см <sup>3</sup>	Предел прочности при растяжении МПа	Модуль упругости ГПа	Удельная Прочность м
Стекланное	2,48	125—25	200—700	5 000—10 000
Крафтцеллюлозное	-	9 1	785	-
Вискозное вытянутое	-	7 5,6	86,9	-
Найлоновое	1,14	5 0,4	46	4 400
Хлопчатобумажное	1,54	4 7,6	77	3 080

Марка стеклянных нитей	Линейная плотность μ, текс	Разрывная нагрузка, Н	Диаметр филаменты d <sub>фл</sub> · 10 <sup>6</sup> , м	Диапазон круток К <sub>н</sub> , м <sup>-1</sup>	ρ, кг/м <sup>3</sup>	σ, Мпа	E+, Гпа	ε <sup>+</sup> , %
БС 6-13×1	13	7,0	6	30-80	2540	3000- 3500(1 750 при 540 °С)	73-74	4,8
БС 6-6,8×1×2	13,5	7,5						
БС 6-13×1×2-78	26	13,5						
БС 7-18×1×2-78	36	18,5	7					
БС 7-22×1×2-78	44	23,5						
ВМС 6-7,2×1×2- 80	14,5	10,0	6	40-120	2560	4200- 4500(2 400 при 540 °С)	95	5,0
ВМС 8-26×1×2- 80	52	30,0	8					
ВМС 9-18×1×3- 80	54		9					

Таблица 2. Марочный ассортимент стекланных волокон.

### 1.1.3. Свойства термопластов, армированных короткими волокнами (Продолжение Раздела 1)

Таблица 3. Физико-механические свойства полиамидов,  
наполненных 50% стеклянного волокна

Показатели свойства	Композиции на основе		
	ПА-6	ПА-66	ПА-610
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1570(1,38)	1570(1,4)	1500(1,38)
Разрушающее напряжение, Мпа: при растяжении при изгибе при сжатии	150(2,1-1,8) 280(2,5-5) 168(2,5-3,6)	240(2,8-4,9) 300(3,1-5,1) -	204(3,4) 302(3,6) 98,5(4,7)
Удлинение при разрыве, %	2,5	5	2-3
Модуль упругости, ГПа: при растяжении при изгибе	12,6(5-12) 14	13,5(4,8-7,5) 14,5	- 13,4
Ударная вязкость по Изоду, кг см/см: с надрезом без надреза	20,8(1-3,8) 108	24,2(4,4) 108	4,86(1,5) 35
Деформационная теплостойкость, °С при нагрузке 1,85 МПа	215	260	210
Водопоглощение за 24 часа	0,8(0,27)	0,5(0,33)	0,16(0,4)
Усадка, мм/мм	0,0025(0,28)	0,003(0,2)	0,0025(0,2)
Коэффициент линейного термического расширения, °С <sup>-1</sup> x 10	1,6	1,2-4,0	45

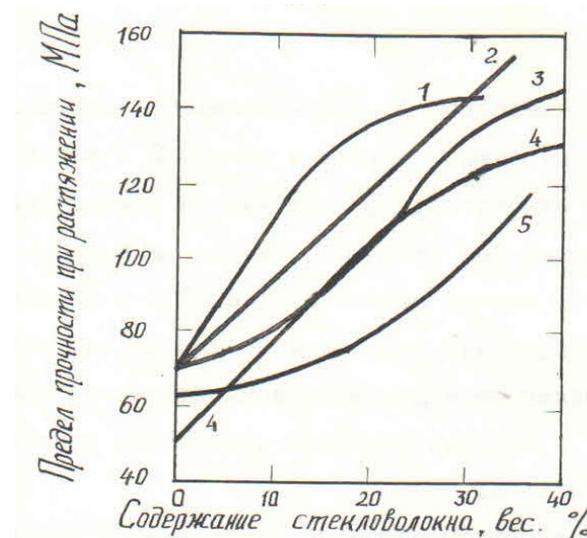


Рис. 2. Изменение прочности при растяжении разных термопластов, заполненных стеклянными волокнами, в зависимости от их весового содержания. Композиции на основе: 1 - поликарбоната; 2 - нейлона 66; 3 - полистиролакрилонитрила; 4 - АБС; 5 - полистирола

*Раздел 1.1.4. Дефекты и их влияние на физико-механические характеристики в ПКМ  
(Продолжение Раздела 1)*

**Дефекты ПКМ различаются:**

- по происхождению;
- местоположению в детали;
- глубине залегания;
- размерам

**По масштабу:**

- **макро-**; крупные дефекты в виде волостей, трещин, тяжей по границе раздела элементов конструкции;
- **мезо-** дефекты на уровне монослоёв и повторяющихся структур ПКМ, **макропоры**;
- **микро-** (армирующие волокна и матрица), отрывы и извлечение из матрицы отдельных волокон, **микропоры**.

(Продолжение Раздела

# Механизм разрушения ПКМ, армированного короткими волокнами

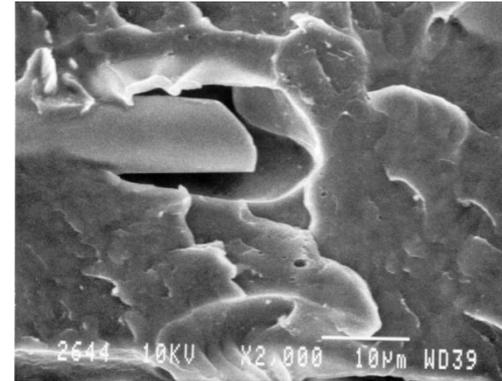
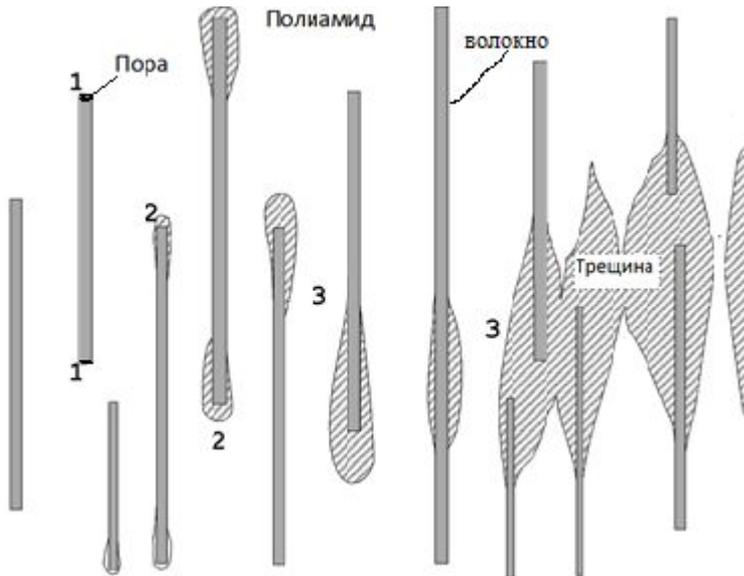
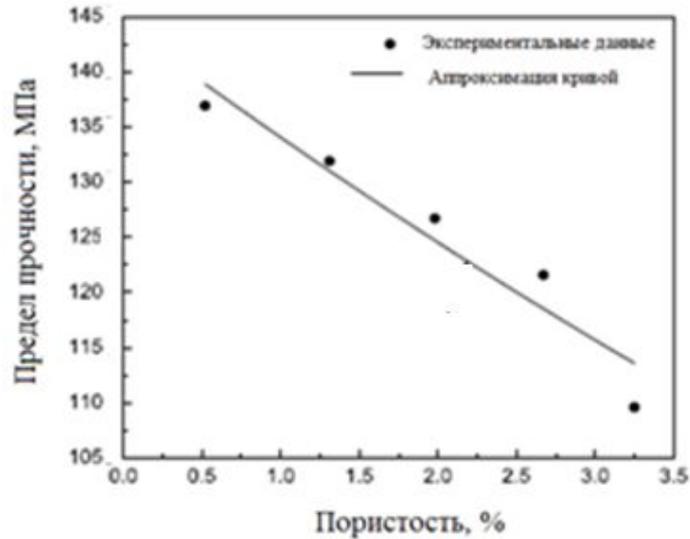


Рис.4. Микрофотография роста краевого дефекта (этап2) для поликапроамидного стеклопластика.

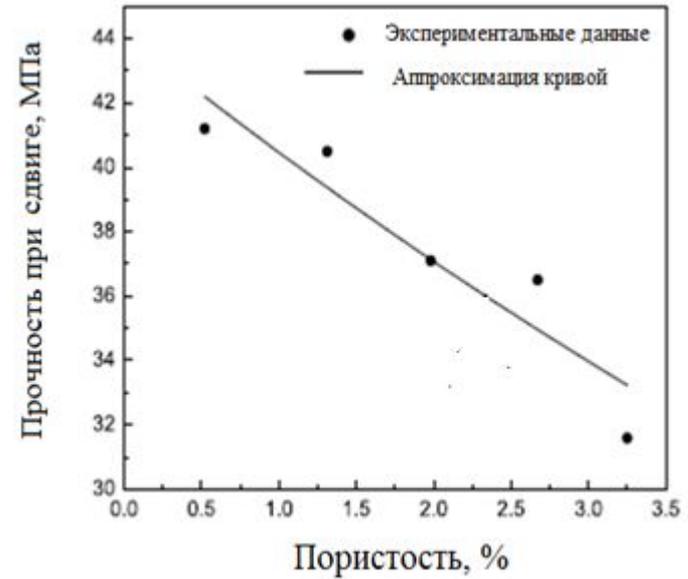
Рис. 3. Процесс образования и роста дефекта

1. Материал без приложения нагрузки.
2. Инициирование роста дефекта на торцах волокон в начальный момент приложения нагрузки.
3. Рост дефекта по мере роста нагрузки, увеличение размеров торцевых дефектов и слияние их в поперечные трещины.

*Влияние пористости на физико-механические свойства дискретно  
армированного стеклопластика  
(Продолжение Раздела 1)*



(а)



(б)

Рис.5. Зависимость прочности при растяжении (а) и сдвиге (б) от содержания пор в стеклопластике

## 1.2. Аналитическое моделирование деформационно-прочностных свойств термопластичных ПКМ

(Продолжение Раздела 1)

### Микроподход в моделировании ПКМ. Блочный метод

При применении метода конечных элементов для композитов **эффективным оказывается блочный метод.**

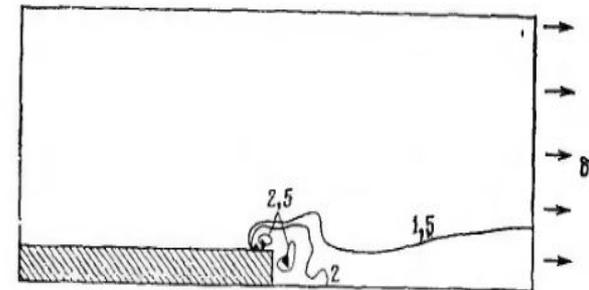
- В блочном методе при разбиении выделяются целые области, которые затем разбиваются на элементы.
- Для каждой такой области полагают, что постоянные материала являются неизменными.
- Одним из блоков является армирующее волокно, а вторым полимерная матрица.

Рис.6. Модель ПКМ, армированного



1 — матрица (полимер)  
2 — армирующий элемент (волокно)

Рис.7. Распределение эквивалентных напряжений на торце волокна



## МОДЕЛИ ПКМ ДЛЯ БЛОЧНОГО МЕТОДА

Все блочные модели являются осесимметричными и состоят из цилиндрических блоков матрицы и армирующего волокна.

### Модель Кокса.

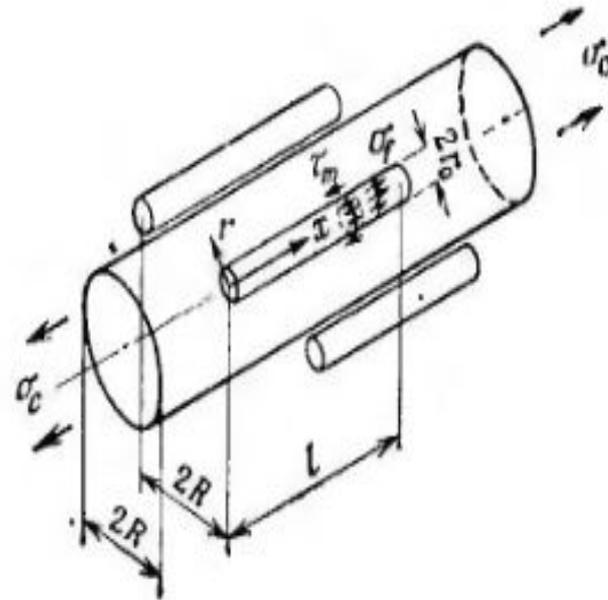
Касательное напряжение, действующее на границе между волокном и матрицей, можно определить из соотношений

$$\sigma_f = \frac{E_f - E_m}{E_m} \sigma_c \left\{ 1 - \frac{\operatorname{ch} \beta (l/2 - x)}{\operatorname{ch} (\beta l/2)} \right\}.$$

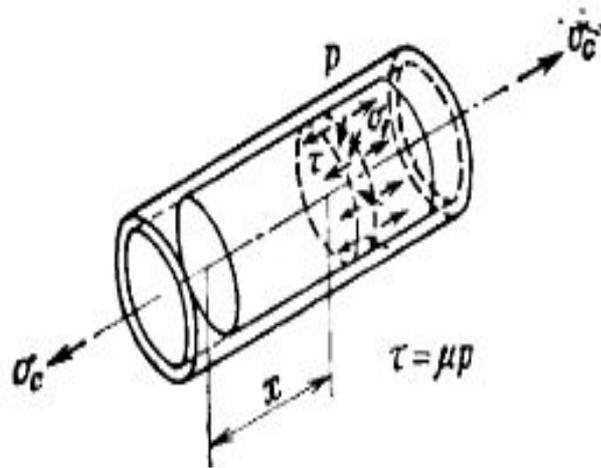
$$\tau_m = \frac{(E_f - E_m) r_f \beta \operatorname{sh} \beta (l/2 - x)}{2 \operatorname{ch} (\beta l/2)},$$

$$\beta = \sqrt{\left\{ \frac{G_m}{E_f} \frac{2\pi}{A_f \ln (R/r_0)} \right\}},$$

где  $r_0$  — радиус поперечного сечения волокна;  $2R$  — расстояние между центрами поперечных сечений волокон;  $A_f$  — площадь поперечного сечения волокна.



## Модель Аутоутер

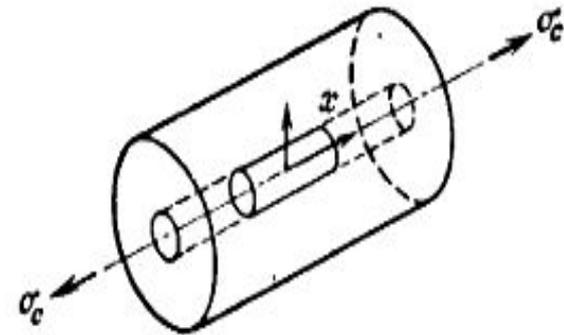


$$\sigma_f = \mu \frac{\sigma_{my} t}{r_0^2} x,$$

где  $t$  — толщина матричного слоя. В таком случае предельная длина волокна равна

$$l_c = \frac{2r_0^2 \sigma_{fu}}{\mu \sigma_{my} t}.$$

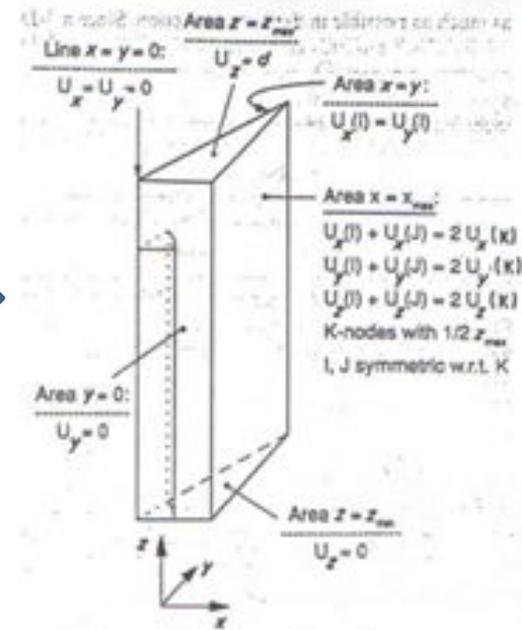
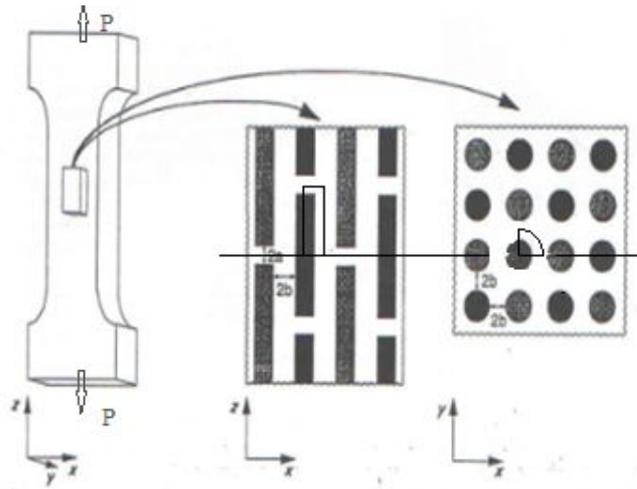
## Модель Дау



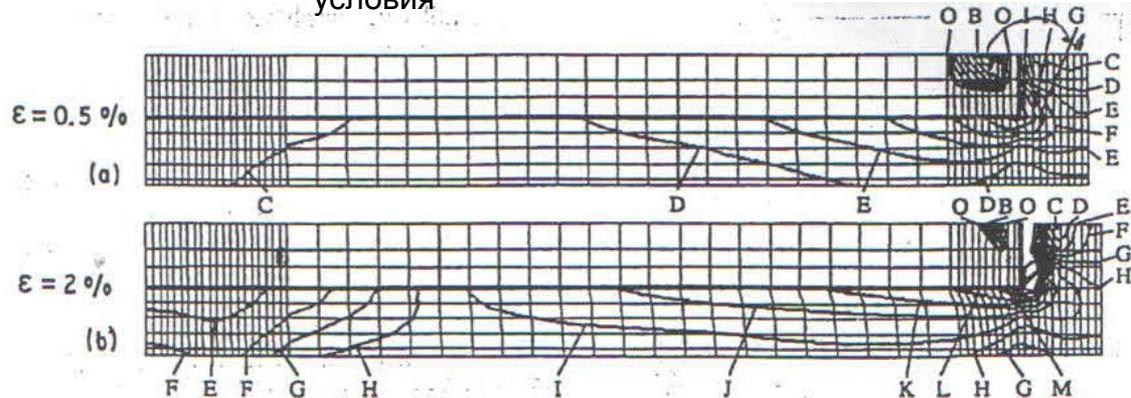
$$\sigma_f = \frac{P_m}{A_f + A_m (E_m/E_f)} \left[ 1 - \frac{\text{ch}(\lambda x/d_f)}{\text{ch}(\lambda l/d_f)} \right],$$

где  $\lambda$  — коэффициент, зависящий от диаметра волокна, модуля упругости и содержания армирующего материала в композите;  $A_m$ ,  $A_f$  — площади поперечных сечений матрицы и волокна;  $P_m$  — сила

### 1.3. Численное моделирование деформационно-прочностных свойств дискретно-армированных ПКМ Модель Брокмюллера



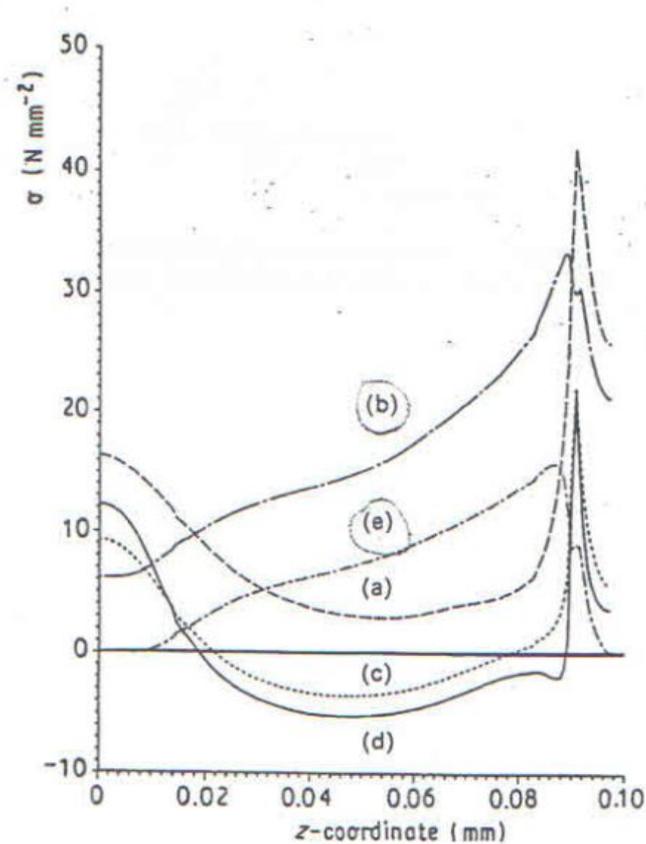
Извлечение элементарной ячейки из геометрической модели композита и граничные условия



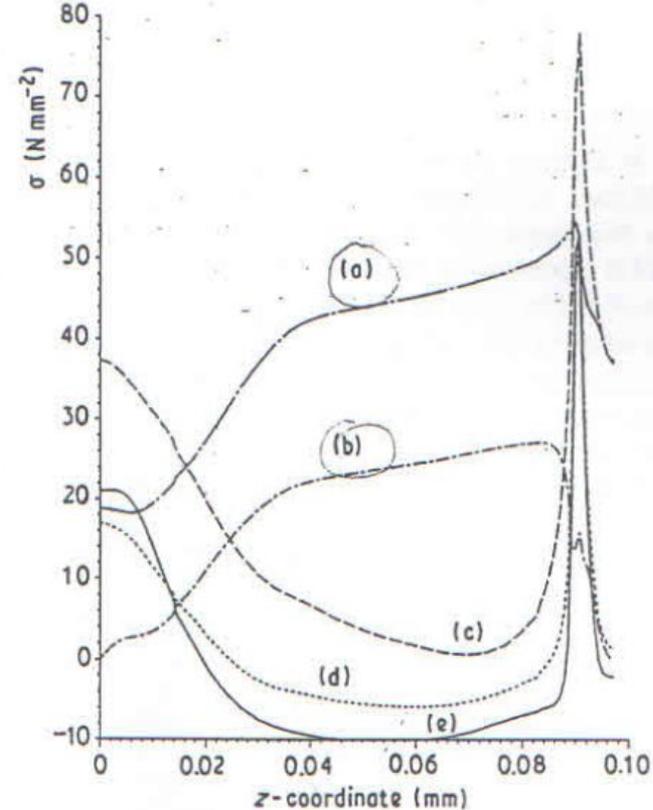
Распределение фон Мизеса напряжений в плоскости  $y = 0$  для (а) упругого случая ( $\epsilon = 0,5\%$ ) и

(б) пластичного ( $\epsilon = 2\%$ ). Нагрузка прикладывается справа (положительное  $z$ -направление).

## (Продолжение Раздела 1)



Напряжения в модели для общей деформации  $\epsilon = 0,5\%$ . Кривая (a)-  $\sigma_z$ ; (b)-  $\sigma_{VM}$ ; (c)-  $\sigma_y$ ; (d)-  $\sigma_x$ ; (e)-  $\tau_{xz}$ .



Напряжения в модели для общей деформации  $\epsilon = 2\%$ . Кривая (a)-  $\sigma_{VM}$ ; (b)-  $\tau_{xz}$ ; (c)-  $\sigma_z$ ; (d)-  $\sigma_y$ ; (e)-  $\sigma_x$ .

2.1. Объекты исследования

Объект исследования: Дискретно армированный стеклопластик, на основе поликапроамидного связующего.

Таблица 4. Характеристики стеклянного волокна ВМС 6-7,2x1x2-80

Параметр	Значение
Линейная плотность $\mu$	14,5
Разрывная нагрузка, Н	10,0
Предел прочности $\sigma_v$ , ГПа	4,2
Предел прочности $\sigma_x$ , ГПа	2,1
Модуль упругости $E_y$ , ГПа	95
Модуль упругости $E_x$ , ГПа	50
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	2560

Таблица 5. Характеристики поликапроамида

Наименование показателя	Величина
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1150-1160
Температура плавления, °С	220-250
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	65-85
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	100-110
Относительное удлинение при разрыве, %	15-30
Изгибающее напряжение при величине прогиба равной 1.5 толщины образца, МПа, не менее	80
Сопrotивление ударной нагрузке (ударная вязкость), без надреза, кДж/м <sup>2</sup>	не разрушаются
Модуль упругости, ГПа	2,3-2,4

Рис.8. Тканый полуфабрикат ТОПАС, полученный по волоконной технологии

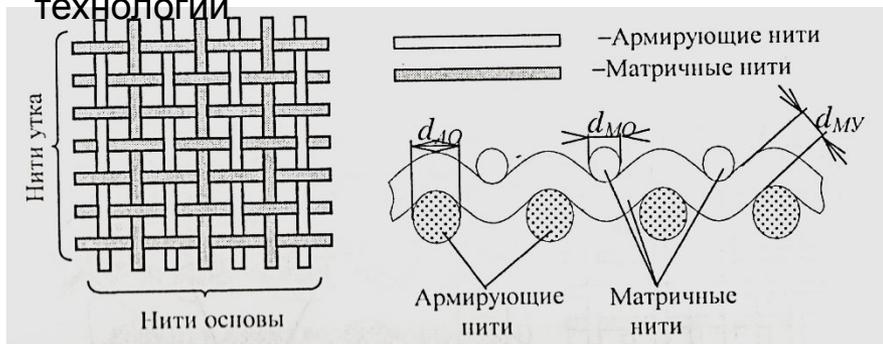


Таблица 6. Характеристики тканного полуфабриката ТОПАС

Марка ТП	Нить ( $\mu$ , текс)		Плотность укладки по утку (по основе), см <sup>-1</sup>	$n_a/n_{m\ v}$	$\phi_a$	Масса 1 м <sup>2</sup> , г	Разрывная нагрузка полоски ткани шириной 50мм, Н	
	Основа	Уток					Основа	Уток
ТОПАС-1	ВМПС 6-7,2x1x4 (29) ПКА (50)	ПКА(50)	(25) (10)	2,5	0,36	140	766	669

(Продолжение Раздела  
 2)  
 Схема изготовления образца стеклопластика



1. Раскрой тканого полуфабриката ТОПАС и полиамидной плёнки на заготовки.



2. Подготовка формы и сборка пакета из 11 слоёв (Размер пресс-формы= 200 x 100 мм)



3. Прессование при  $T = 240^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 2,5 \text{ МПа}$ ,  $t = 15 \text{ мин}$ ;  
 4. Охлаждение под давлением до  $T = 25^{\circ}\text{C}$



5. Механическая обработка прессованного ПСМ

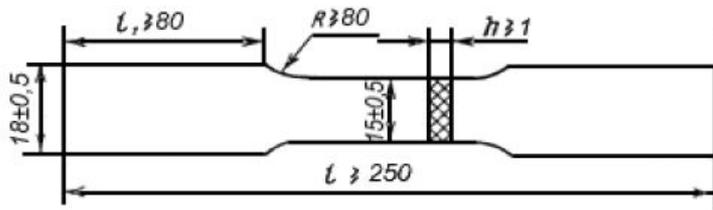


6. Вырубка образцов в виде лопаток для испытаний

## 2.2 Методики испытаний.

Определение физико-механических характеристик стеклопластика при растяжении  
по ГОСТ 25.601-80

(Продолжение Раздела  
2)



Эскиз образца в виде двусторонней лопатки для испытаний на одноосное растяжение с размерами, выполненными по ГОСТ



Образцы для испытаний на растяжение

1. Предел прочности при растяжении определяется из уравнения:

$$\sigma^+ = R^{\max} / A$$

где

$\sigma^+$  - предельная прочность на растяжение, МПа

$R^{\max}$  - максимальная нагрузка до разрушения, Н

$A$  - средняя площадь поперечного сечения, мм<sup>2</sup>

2. Модуль упругости при растяжении по данным кривой напряжения-деформации рассчитывается по формуле:

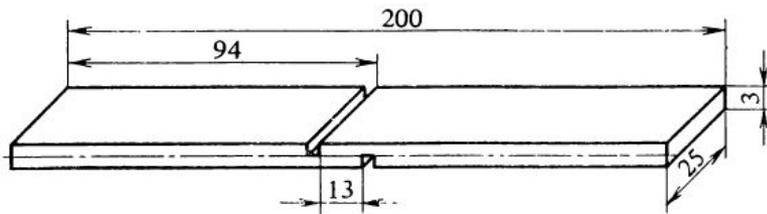
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

где  $E$  - модуль упругости при растяжении, ГПа

$\Delta\sigma$  - различие в растягивающих напряжениях между двумя деформируемыми точками

$\Delta\varepsilon$  - различие между двумя точками деформации (номинально 0,002)

Определение физико-механических характеристик стеклопластика при межслоевом сдвиге  
(Продолжение Раздела 2)



Образец для определения  
прочности  
при межслоевом сдвиге.

Прочность при межслоевом сдвиге определяется

по формуле:

$$\tau = P_{\text{разр}}/F$$

где:

$\tau$  – прочность при межслоевом сдвиге, МПа

$P_{\text{разр}}$  – разрушающее усилие, Н

$F$  – площадь среза, мм<sup>2</sup>

Статистическая обработка проводилась по методу Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95, по формулам:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i;$$

$$s_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2};$$

$$v = \frac{s}{\langle x \rangle}.$$

Результаты испытаний стеклопластика при  
растяжении

№ образца	Предел прочности при разрыве $\sigma_y$ , МПа	Предел прочности при разрыве $\sigma_y$ с доверительной вероятностью 0,95, МПа	№ образца	Предел прочности при разрыве $\sigma_x$ , МПа	Предел прочности при разрыве $\sigma_x$ с доверительной вероятностью 0,95, МПа
1	129,5	130,6±13,65	1	79,9	80,2±4,1
2	130,8		2	79,5	
3	130,2		3	80,4	
4	129,1		4	80,1	
5	130,5		5	79,7	

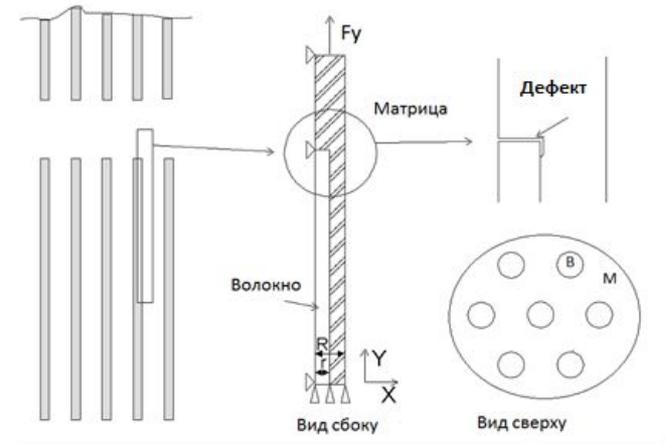
Результаты испытаний стеклопластика при межслоевом сдвиге

№ образца	Предел прочности при разрыве $\tau_{xz}$ , МПа	Предел прочности при разрыве $\tau_{xz}$ с доверительной вероятностью 0,95, МПа
1	33,2	32,8±2,42
2	32,7	
3	32,9	
4	33,0	
5	32,6	

**Раздел 3. Разработка дискретно-армированной модели ПКМ с дефектом на границе раздела и исследование деформационно-прочностных свойств**  
**3.1. Разработка физической модели и структуры с дефектом в виде пор на границе раздела**

**Свойства компонентов ПКМ.**

Параметр	Волокно	Матрица
Модуль упругости $E_x^*$ , ГПа	50	6
Модуль упругости $E_y^*$ , ГПа	80	6
Коэффициент Пуассона $\mu$	0,2	0,27
Объемное содержание %	20	80
Разрушающее перемещение, мкм		2,5
Диаметр волокна, мкм	6	



**Рис. 9. Физическая модель ПКМ**

**Допущения:**

- 1) Все волокна расположены в направлении распределения нагрузки регулярно и равномерно.
- 2) Краевой эффект моделируется отсутствием взаимодействия между волокном и матрицы на торцах волокон.
- 3) Напряжение распределяется в волокне и матрице равномерно.
- 4) Разрушение происходит при достижении волокнами предела прочности.
- 5) Модель осесимметрична.

**Граничные условия:**

- 1) Модель нагружается вдоль оси Y усилием, соответствующим предельному значению относительного удлинения стеклянных волокон.
- 2) Нижняя часть модели закреплена консольно.
- 3) Левая граница модели ограничена перемещениями по оси X.
- 4) Правая граница перемещается свободно.

*3.2. Методика построения КЭ модели развития дефекта на  
границе раздела фаз.*

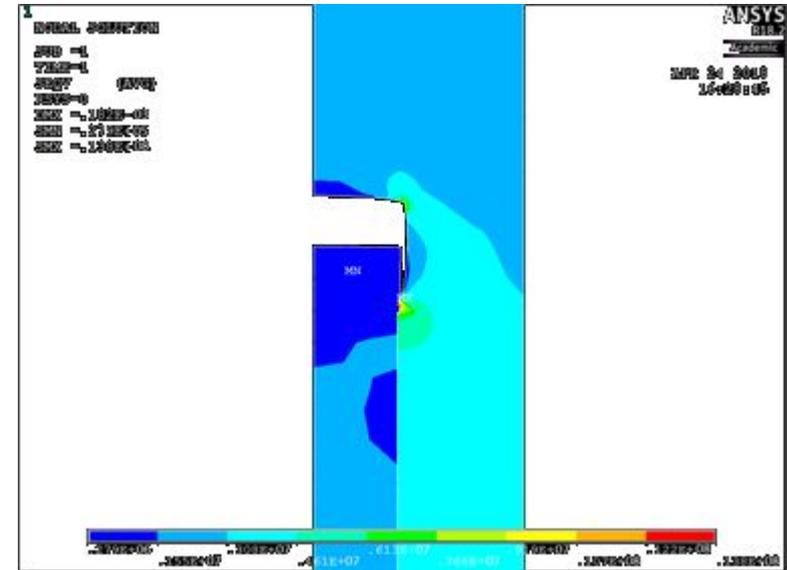
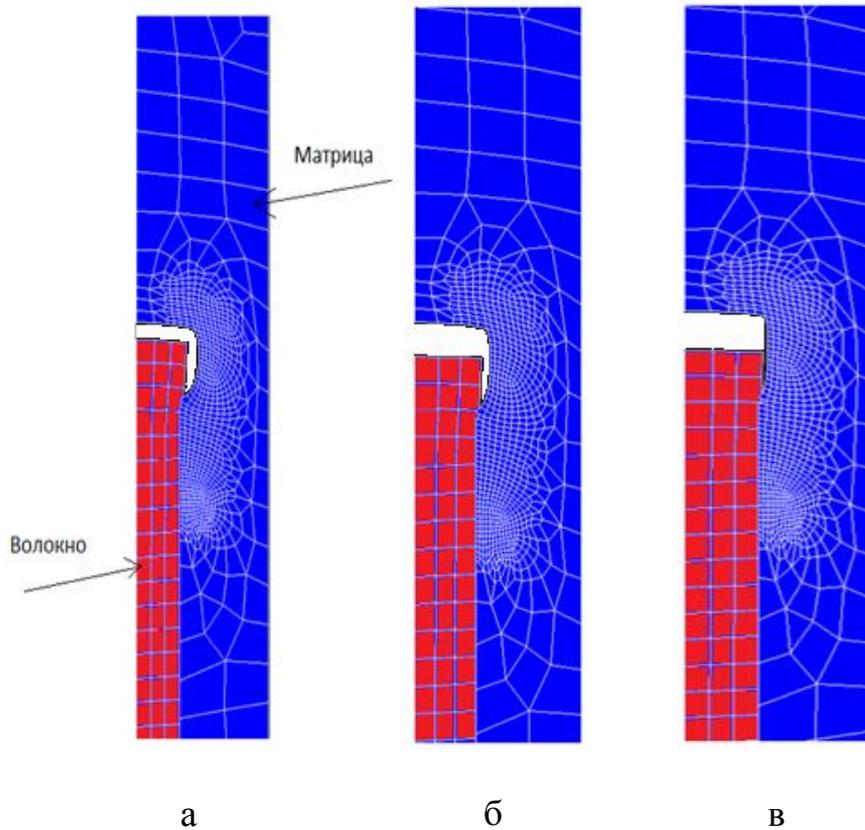
*(Продолжение Раздела 3)*

Методика построения конечно-элементной модели  
(КЭ)

в программном комплексе ANSYS:

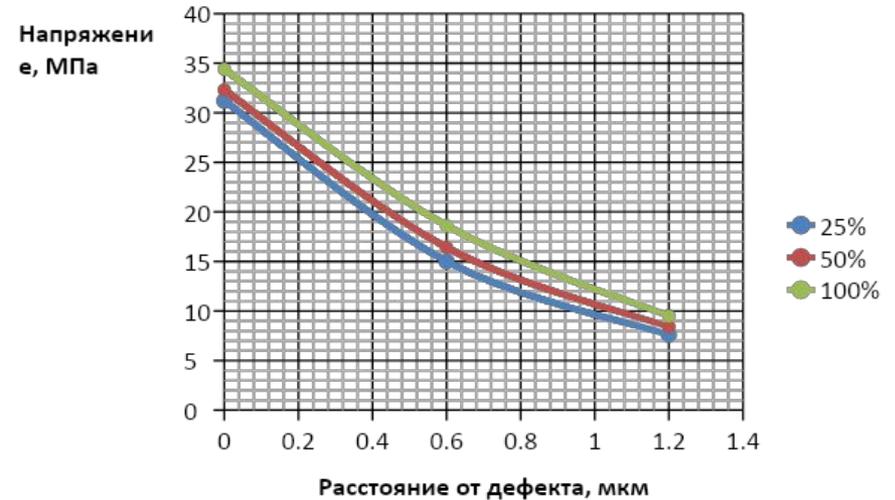
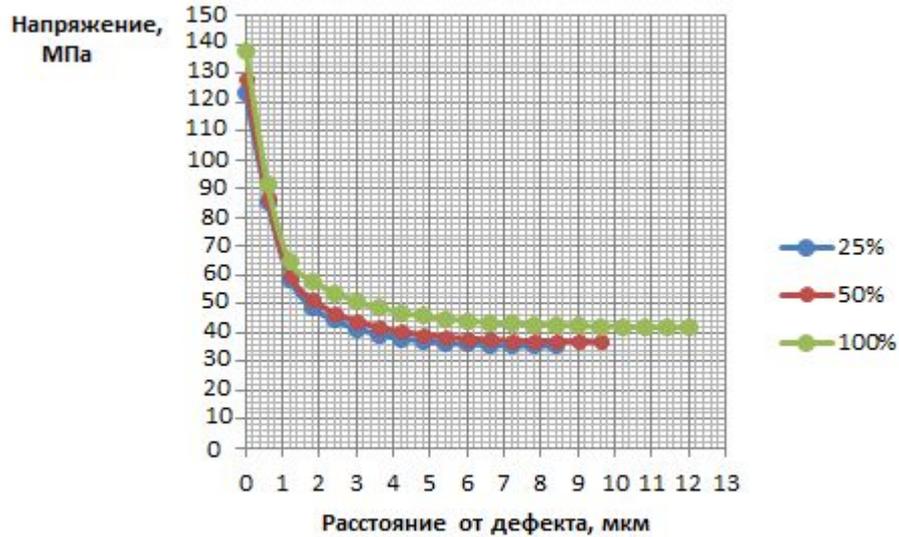
- 1) Постановка задачи
- 2) Назначение типов конечных элементов и их особенности
- 3) Определение свойств материала модели
- 4) Задание упругих констант для стеклянного волокна
- 5) Создание геометрической модели
- 6) Присвоение свойств блокам волокна и матрицы
- 7) Разбиение модели на конечные элементы (КЭ)
- 8) Задание граничных условий
- 9) Расчет
- 10) Отображение деформированного и недеформированного состояния модели

3.3. Влияние наличия дефекта на границе раздела на деформационно - прочностные свойства стеклопластика с использованием КЭ модели.  
(Продолжение Раздела 3)



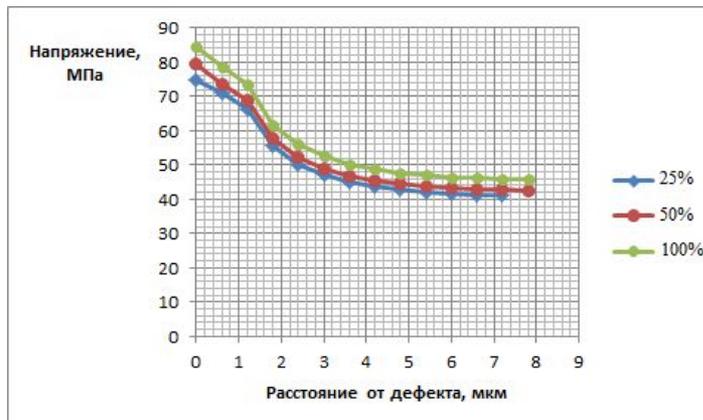
Напряжённое состояние модели

Деформированное состояние стеклопластика а– 25%, б – 50%, в- 100% от разрушающей деформации волокна

(Продолжение Раздела  
3)

Напряжения  $\sigma_y$  на границе раздела волокно - матрица при деформациях 25%, 50%, 100% от разрушающей деформации волокна в зависимости от расстояния от дефекта.

Сдвиговые напряжения  $\tau_{xy}$  на границе волокно - матрица при деформации 25%, 50%, 100% от разрушающей деформации волокна в зависимости от расстояния от дефекта.



Нормальные напряжения  $\sigma_x$  на границе раздела волокно - матрица при деформациях 25%, 50%, 100% от разрушающей деформации волокна в зависимости от расстояния от дефекта.

3.4. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными  
(Продолжение Раздела  
3)

Параметр	Моделирование	Экспериментальные данные	Отклонение (моделирование), %	Аналитическое решение (модель Кокса)	Отклонение (аналитическое решение), %
Нормальное напряжение $\sigma_x$ , МПа	85	80,2±4,1	5,5	91,8	14,5
Напряжение $\sigma_y$ , МПа	138	130,6±13,65	5,3	144,9	11,0
Сдвиговое напряжение $\tau_{xy}$ , МПа	34,4	32,8±2,42	5,6	35,9	9,7

## Вывод

В первом разделе рассмотрены материалы и основы создания дискретно армированных стеклопластиков, проанализированы термопластичные матрицы, стеклянные армирующие волокна, свойства термопластов, армированных короткими волокнами, дефекты и их влияние на физико-механические характеристики стеклопластиков. Приведены аналитические модели для прогнозирования деформационно-прочностных ПКМ. Рассмотрены методы построения КЭ модели ПКМ с учётом развития дефекта в виде краевого эффекта торцов волокон на границе раздела волокно-матрица. Выявлены преимущества использования блочного метода для построения КЭ моделей ПКМ. Для исследования влияния микроструктуры ПКМ на деформационно-прочностные свойства при различной нагрузке, в качестве базовой была использована модель Кокса.

Во втором разделе описаны методика получения образцов однонаправленного дискретно армированного стеклопластика и методики испытаний этого материала на растяжение и сдвиг. Проведены экспериментальные исследования по определению основных физико-механических свойств стеклопластика при растяжении и сдвиге. Предельные значения напряжений возникающих при растяжении и сдвиге составили:  $\sigma_x = 80,2 \pm 4,1$   $\sigma_y = 130,6 \pm 13,65$   $\tau_{xy} = 32,8 \pm 2,42$

В третьем разделе исследовано с помощью КЭ моделирования влияние дефекта на границе раздела фаз на деформационно-прочностные свойства стеклопластика. На основании выбранных начальных условий и допущений, предложена физическая модель, построена КЭ модель, осуществлён расчёт, проанализированы полученные данные, проведена верификация модели на адекватность. Получены зависимости, характеризующие напряженное состояние ПКМ при различной степени деформирования. Анализ полей напряжений, возникающих в ПКМ при разрушении, показал, что в разрушении ПКМ главную роль играют нормальные напряжения. Установлено, что предложенная в работе конечно-элементная модель стеклопластика содержащая дефект в виде краевого эффекта торцов волокон на границе раздела волокно-матрица показала хорошую корреляцию с экспериментальными данными. Отклонения данных численного моделирования от экспериментальных соответственно равны: для  $\sigma_x$  - 5,5%,  $\sigma_y$  - 5,3%,  $\tau_{xy}$  - 5,6%. Аналитический подход с использованием модели Кокса в определении вышеназванных характеристик даёт гораздо большую погрешность для  $\sigma_x$  - 14,5%,  $\sigma_y$  - 11,0%,  $\tau_{xy}$  - 9,7%.

**СПАСИБО ЗА  
ВНИМАНИЕ!**