

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

## Структура ВКРМ:

### Введение

1. Дефекты и их влияние на физико-механические характеристики в ПКМ
2. Моделирование деформационно-прочностных свойств дискретно-армированных стеклопластиков
  - 2.1. Аналитическое моделирование деформационно-прочностных свойств термопластичных ПКМ
  - 2.2. Численное моделирование
3. Разработка дискретно-армированных моделей ПКМ с дефектами на границе раздела и исследование деформационно-прочностных свойств
  - 3.1. Разработка физической модели и структуры с дефектом в виде пор на границе раздела
  - 3.2. Методика построения КЭ модели развития дефекта на границе раздела фаз
  - 3.3. Влияние наличия дефектов на границе раздела на деформационно-прочностные свойства
4. Экспериментальная проверка результатов численного моделирования
  - 4.1. Объекты исследования
  - 4.2. Методики исследования
  - 4.3. Результаты их обсуждения

### Заключение

### Список литературы

Раздел 1. Дефекты и их влияние на физико-механические характеристики в ПКМ  
1.1 Литературный обзор

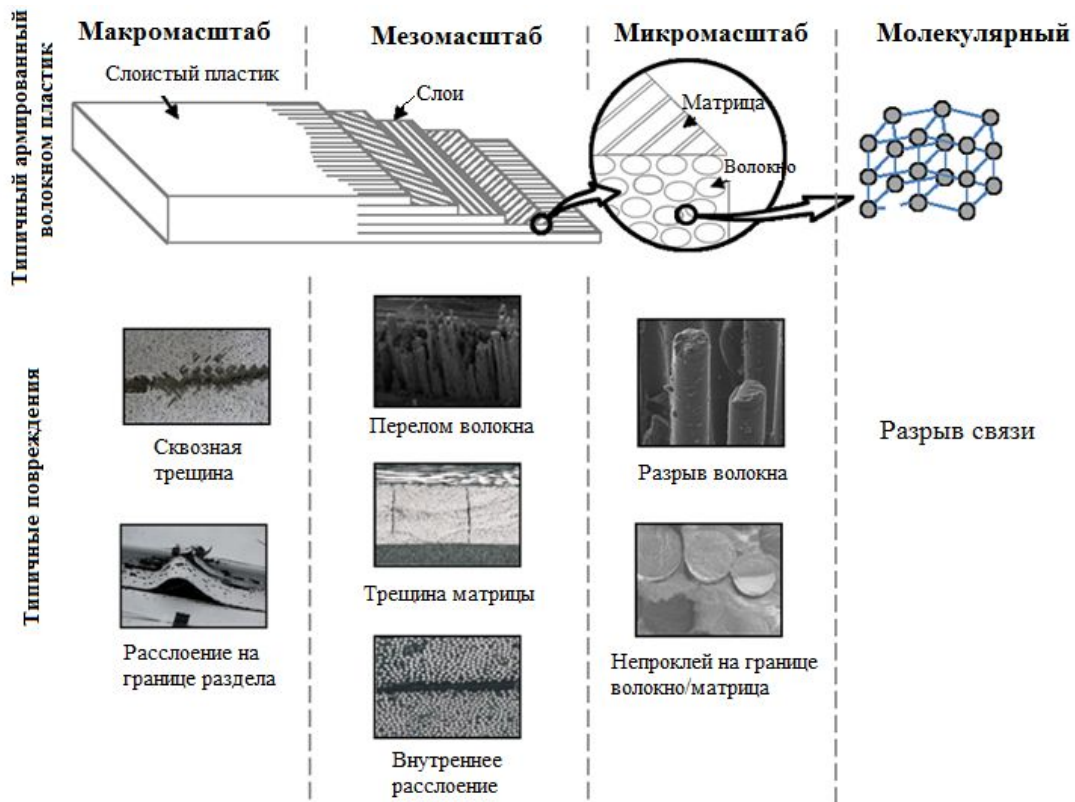
Схема основных уровней структуры армированных слоистых ПКМ и виды типичных повреждений на этих уровнях

**Дефекты ПКМ различаются:**

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

**По масштабу:**

- **макро-**; сквозные трещины и расслоения по границе раздела элементов конструкции;
- **мезо-** межслоевые трещины и расслоения, **макропоры**;
- **микро-** (армирующие волокна и матрица), отрывы и извлечение из матрицы отдельных волокон, **микропоры**.



## *Стеклопластики на основе термопластичных матриц, армированных короткими волокнами*

*Стеклопластики* являются одними из наиболее применяемых композиционных материалов, что обусловлено их высокими свойствами и относительно невысокой стоимостью.

### Свойства элементарного стеклянного волокна

<b>Плотность, г/см<sup>3</sup></b>	<b>2,55</b>
<b>Термический коэффициент линейного расширения, °С</b>	<b>0,0000049</b>
<b>Разрушающее напряжение при растяжении, МПа</b>	<b>1755—2215</b>
<b>Модуль упругости, МПа</b>	<b>70000</b>
<b>Относительное удлинение при растяжении, %</b>	<b>2—3</b>
<b>Диаметр волокна, мкм</b>	<b>4,5-9,6</b>

## Упругопрочностные свойства матричных полимеров

Тип термопласта	плотность, г/см <sup>3</sup>	$s^+$ , МПа	$E^+$ , МПа	$e^+$ , %	$s_{ви}$ , МПа	$E_{ви}$ , МПа	$G_{IC}$ , Дж/м <sup>2</sup>	В. П., % масс. <sup>2)</sup>
1. Полисульфон Udel P-1700, ПСН	1,24	70	2500	50-100	110	2700	1700	0,02
2. Полиэфирсульфон Victrex 200 P	1,37	86	2500	40-80	130	2600	1700	0,43
3. Полиарилсульфон Radel	1,29	72	2440	60	86	2300	-	1,8
4. Полифениленсульфид Fortron	1,36	80	3700	3-5	130	3800	1850-2440 <sup>1)</sup>	0,01
5. Полиэфирэфиркетон Victrex 150 G	1,3	150	3800	100	160-175	3800	2000	0,25
6. ЖКП Vectra A 950	1,4	126	800	4	-	740	-	0,02
7. ЖКП Xudar SRT-300	1,4	116	1700	5	130	1100	-	0,2
8. Полиамидимид Torlon 4203	1,42	195	3600	15	200	4500	-	0,12-0,33
9. Полиэфиримид Ultem 1000	1,27	105	3000	60	145	3300	-	0,25
10. Полиимид 2080	1,4	140	3000	-	200	3300	-	-
12. Полиимид LARC-TPI	1,38	94-140	4000	4,5	180	4600	660 <sup>3)</sup>	-
13. ПА 6	1,13	50	2000	70-110	60-70	1900-2000	0	3,5

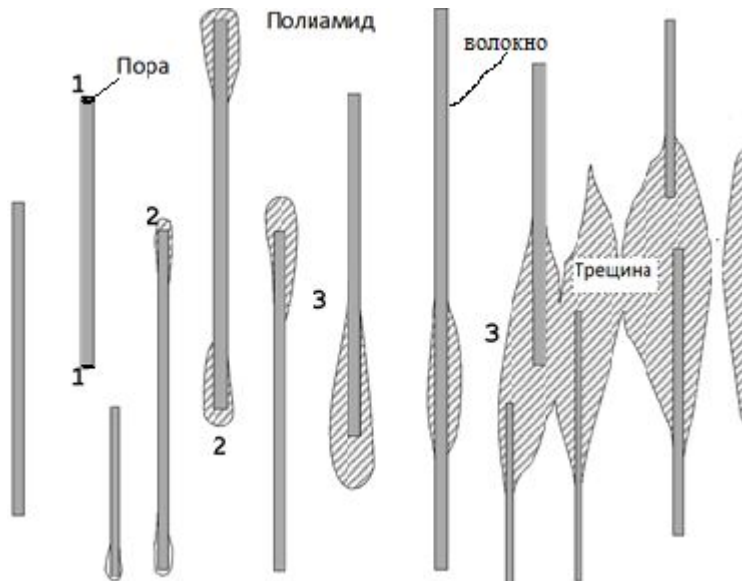
# Влияние дефектов на прочностные характеристики ПКМ

## Ударная прочность стеклонаполненных полиамидов при различных условиях нагружения

*Ударная прочность стеклонаполненных полиамидов при различных условиях нагружения.*

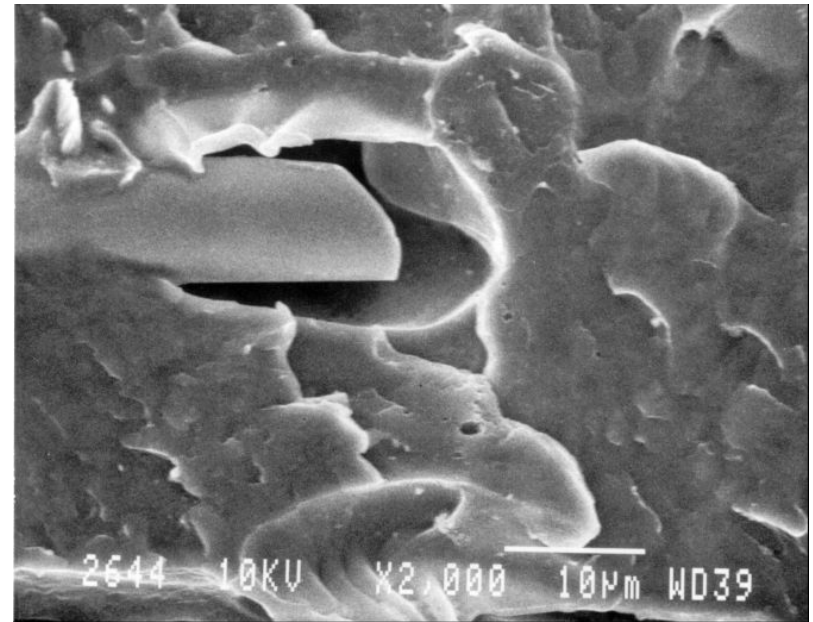
Полиамид, используемый в качестве связующего	Содержание стекловолокна, % (вес)	Удельная ударная вязкость кгс·см/см <sup>2</sup>	Ударная вязкость по Изору, кгс·см/см		Разрывное напряжение при различных скоростях нагружения, МПа				Ударная вязкость при различных скоростях нагружения кгс·см/см <sup>2</sup>			
			с надрезом	без надреза	0,13 см/мин	2,54 см/мин	1016 см/мин	20320 см/мин	0,13 см/мин	2,54 см/мин	1016 см/мин	20320 см/мин
Полиамид - 6	30	192,6	12,05	108,8	147,6	161,7	209,5	-	67,7	98,5	160	193,5
Полиамид - 6 с длинным стекловолокном	30	149,8	15,73	95,9	149,0	163,1	192,0	-	52,8	69,5	124	150
Полиамид - 610	30	214	12,6	119,7	147,6	161,7	230,6	-	80,4	120	182	214
Полиамид - 66	30	182	10,9	95	170,2	186,3	230,1	253,4	79	107	148	182
Полиамид - 66 с длинным стекловолокном	30	171,2	13,1	92,5	180,7	190,5	235,5	-	65	85,5	141,5	171,5

## Механизм разрушения ПКМ, армированного короткими волокнами



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.



Микрофотография роста краевого дефекта  
(этап2)  
для поликапроамидного стеклопластика [1]

## Раздел 2. Моделирование деформационно-прочностных свойств

### дискретно-армированных стеклопластиков

#### 2.1. Аналитическое моделирование

#### деформационно-прочностных свойств термопластичных ПКМ

Модель ПКМ, армированного

### Микроподход в моделировании ПКМ. Блочный метод

При применении метода конечных элементов для композитов с учетом указанного выше обстоятельства **эффективным** оказывается **блочный метод**.

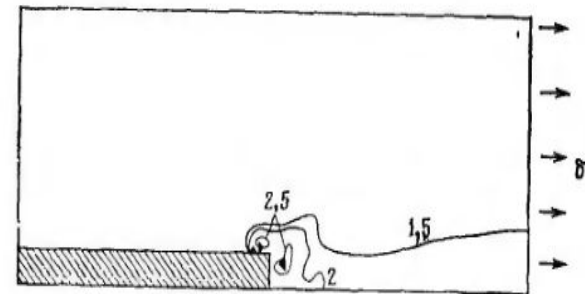
В блочном методе при разбиении выделяются целые области, которые затем разбиваются на элементы. Для каждой такой области полагают, что постоянные материала являются неизменными. Следовательно, если имеются разнородные материалы, то в таком случае разбиение на области желательно проводить по материалам.

Одним из блоков является армирующее волокно.



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

Распределение эквивалентных напряжений на конце волокна





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

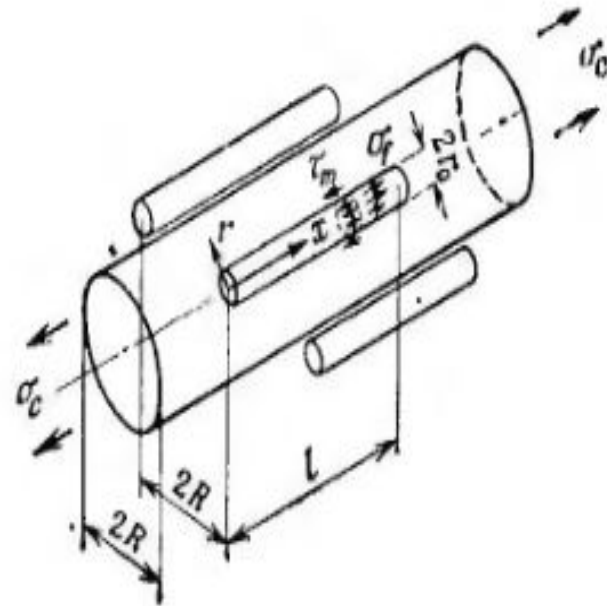
### Модель Кокса.

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

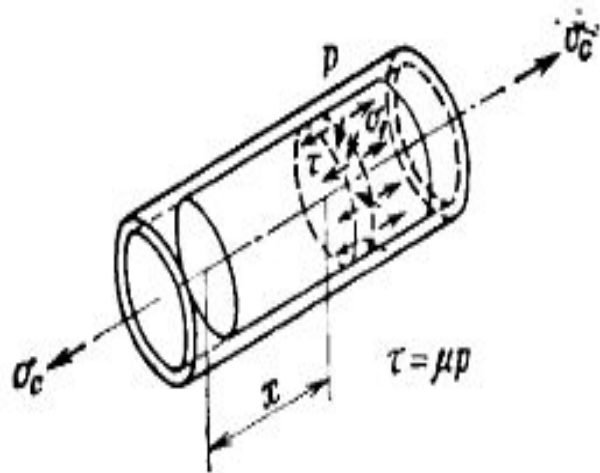
$$\tau_m = \frac{(E_f - E_m) r_f \beta \operatorname{sh} \beta (l/2 - x)}{2 \operatorname{ch} (\beta l/2)},$$

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

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



## Модель Аутоутер

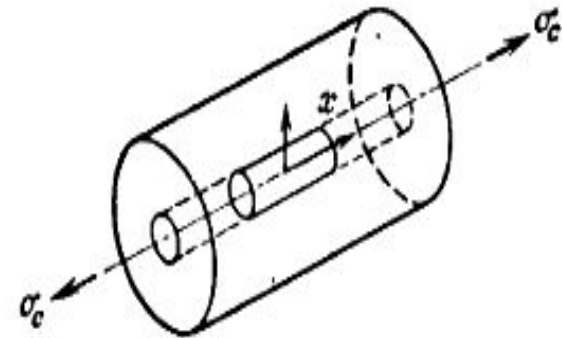


$$\sigma_f = \mu \frac{\sigma_{my} t}{r_0^2} x,$$

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

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

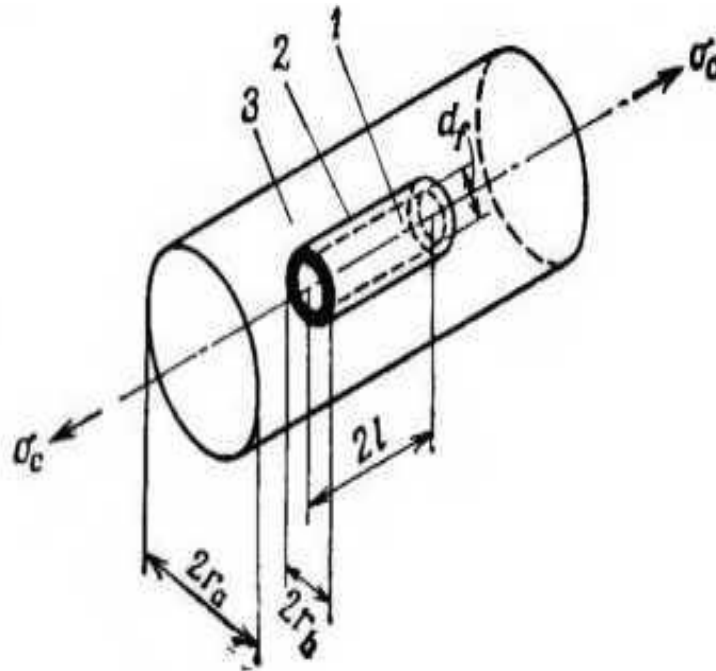
## Модель Дау



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

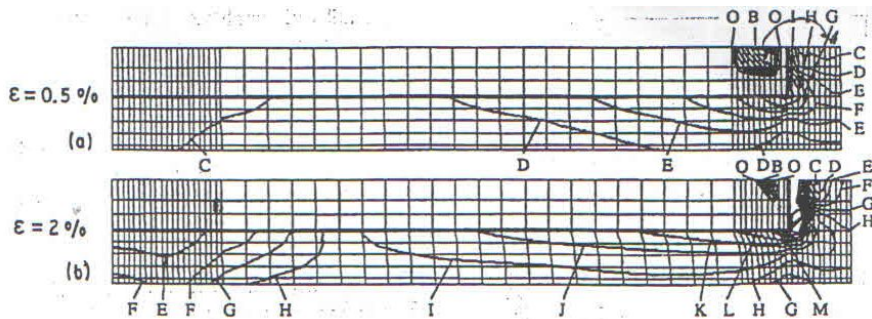
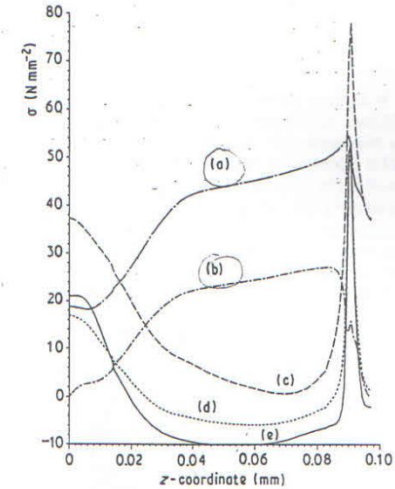
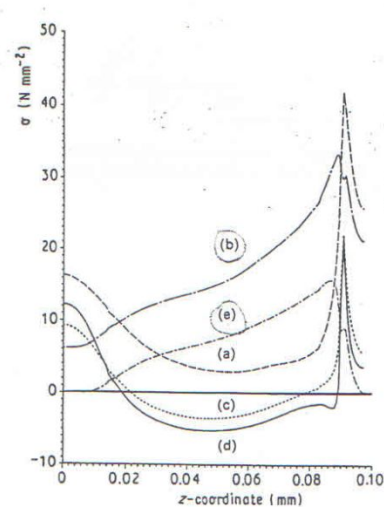
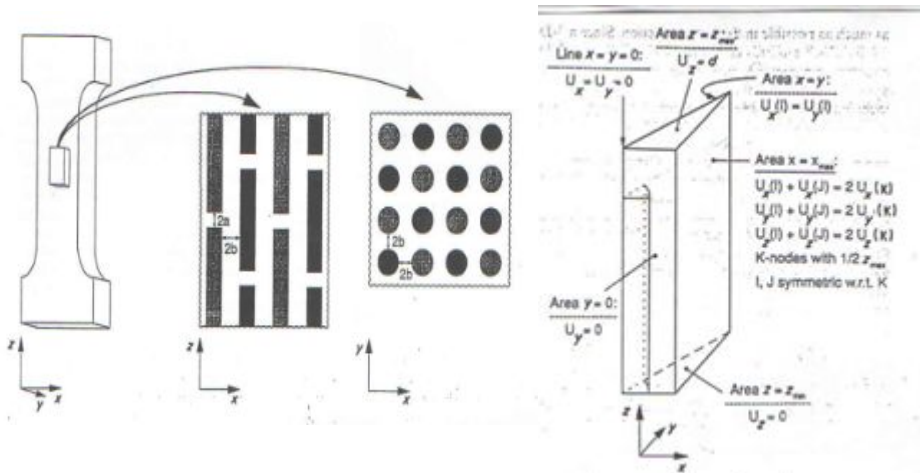
где  $\lambda$  — коэффициент, зависящий от диаметра волокна, модуля упругости и содержания армирующего материала в композите;  $A_m$ ,  $A_f$  — площади поперечных сечений матрицы и волокна;  $P_m$  — сила

## Модель Розена для дискретных волокон



1 — волокно, 2 —  
адгезионный слой, 3 —  
матрица

## 2.2 Численное моделирование Модель Брокмюллера



Распределение напряжений  
по фон Мизесу в  $x, y$ -  
направлениях

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

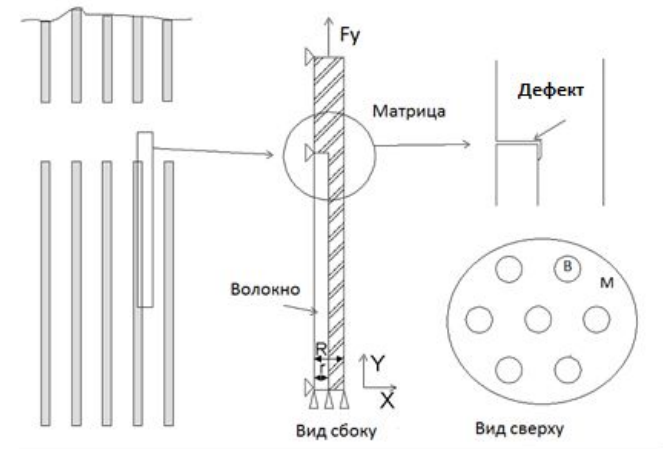
Задачи работы:

- 1) Провести анализ литературных данных по дефектам и их влиянию на физико-механические свойства ПКМ, армированных короткими волокнами.
- 2) Разработать физическую модель структуры ПКМ с дефектом на торцах армирующих волокон.
- 3) Разработать КЭ-модель такого ПКМ и методик построения этой модели в программном комплексе ANSYS.
- 4) Изготовить образцы стеклопластика на основе поликапроамидной матрицы и коротких стеклянных волокон.
- 5) Провести испытания на растяжение по ГОСТ 25.601-80 и сдвиг.
- 6) Провести анализ результатов численного моделирования и эксперимента.

**Раздел 3. Разработка дискретно-армированных моделей ПКМ с дефектами 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	



**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.

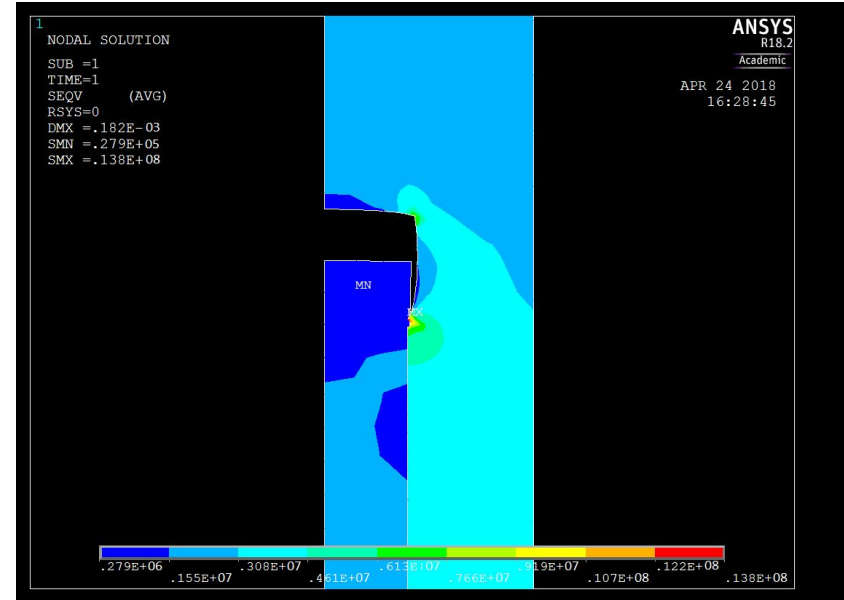
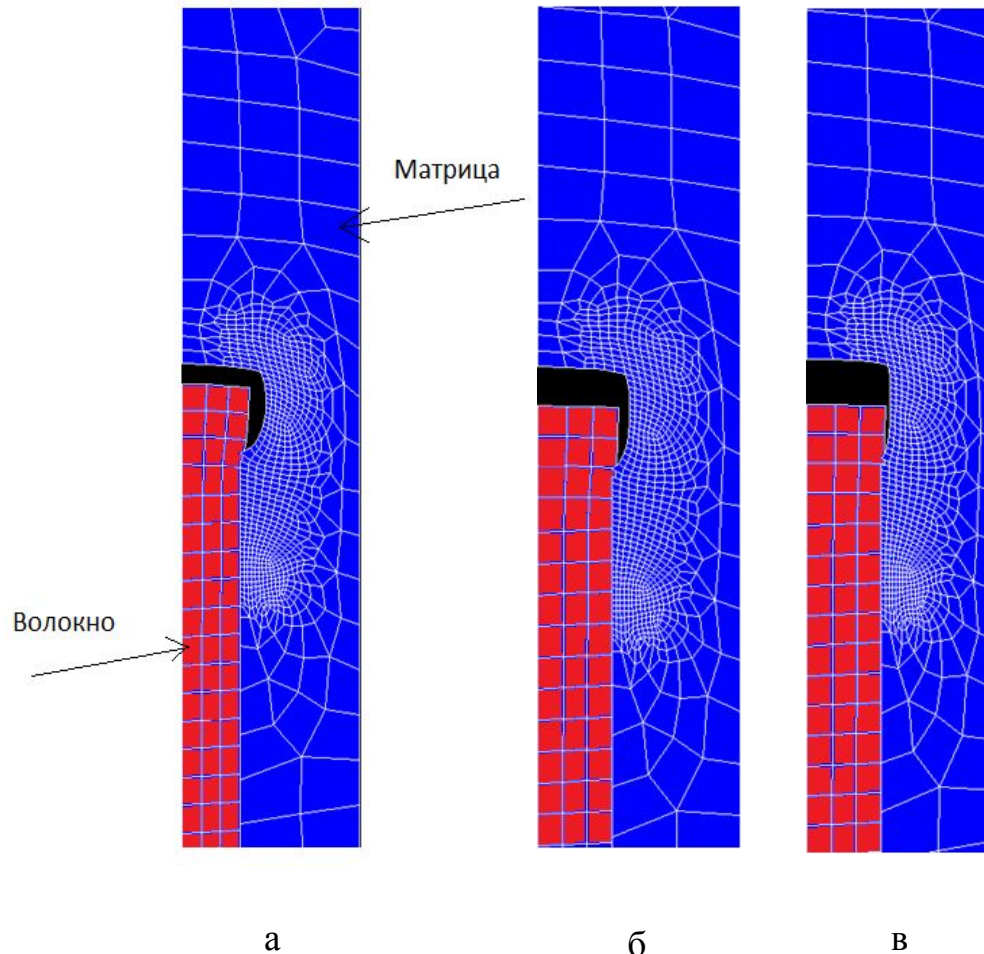
### *3.2. Методика построения КЭ модели развития дефекта на границе раздела фаз.*

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

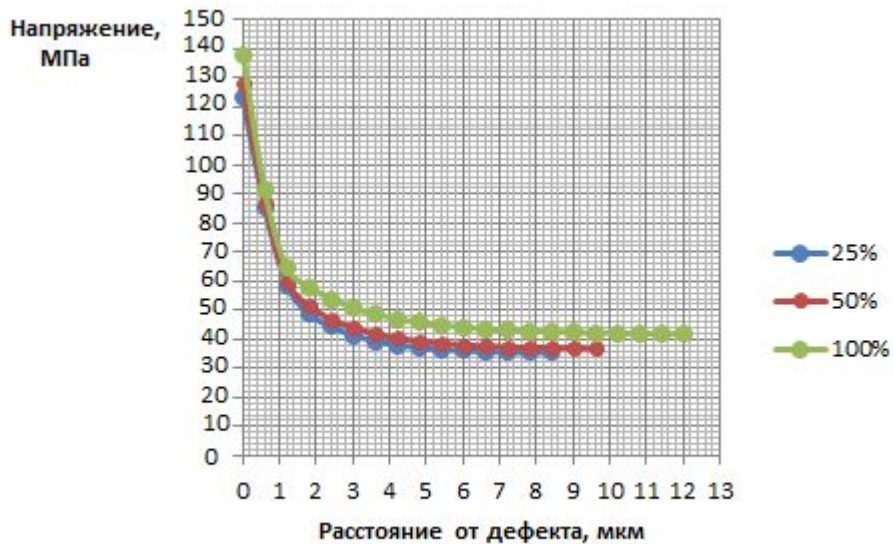
### 3.3 Влияние наличия дефекта на границе раздела на деформационно - прочностные свойства стеклопластика с использованием КЭ модели.



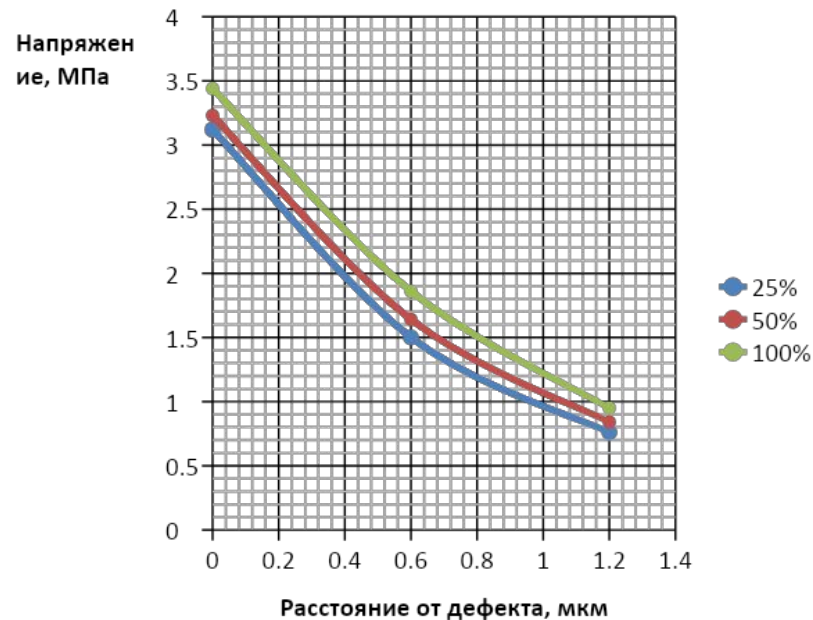
Напряжённое состояние модели

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

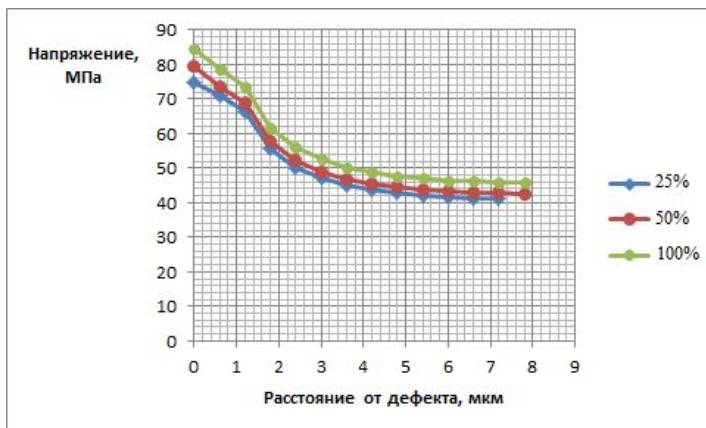




Напряжения  $\sigma_y$  на границе раздела волокно - матрица при деформациях 25%, 50%, 100% от разрушающей деформации волокна в зависимости от расстояния от дефекта.



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.

## Раздел 4. Экспериментальная проверка результатов численного моделирования

### 1.2 Экспериментальная часть

#### 4.1. Объекты исследования

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

Характеристики стеклянного волокна ВМС  
6-7,2x1x2-80

Параметр	Значение
Линейная плотность $\mu$	14,5
Разрывная нагрузка, Н	10,0
Предел прочности $\sigma_{x'}$ , ГПа	4,2
Предел прочности $\sigma_y$ , ГПа	2,1
Модуль упругости $E_y$ , ГПа	95
Модуль упругости $E_x$ , ГПа	50
Плотность $\rho_{ст}$ кг/м <sup>3</sup>	2560

Характеристики  
поликапроамида  
(Полиамид 6)

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

## Схема изготовления образца стеклопластика

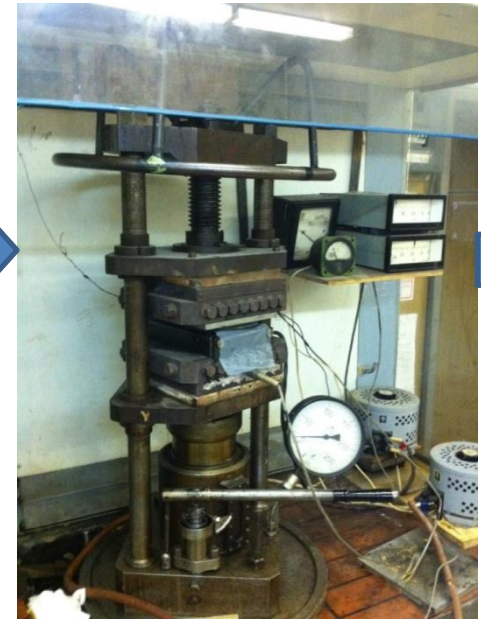
1



2



3-4



5

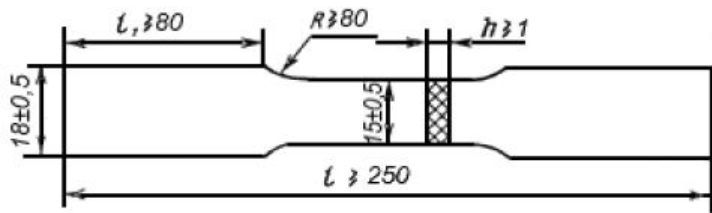


6

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 листового ПКМ.
6. Вырубка образцов в виде лопаток для испытаний

## 4.2 Методика испытаний.

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



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:

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

где

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

$P^{\max}$  - 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:

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

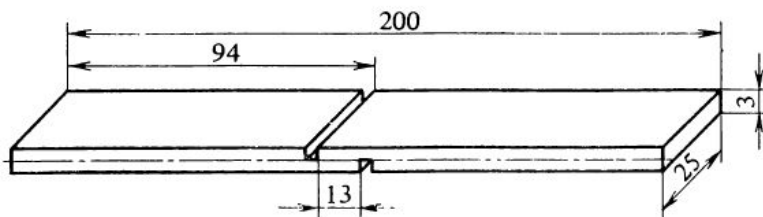
где  $E$  - модуль упругости при растяжении, ГПа

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

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

## Методика испытаний.

Определение физико-механических характеристик стеклопластика при межслоевом сдвиге



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>

## Сравнение результатов экспериментов и численного моделирования.

Параметр	Моделирование	Экспериментальные данные	Отклонение, %
Нормальное напряжение $\sigma_x$ , МПа	85	80,2±4,1	5,5
Напряжение $\sigma_y$ , МПа	138	130,6±13,65	5,3
Сдвиговое напряжение $\tau_{xy}$ , МПа	34,4	32,8±2,42	5,6

Экспериментальная прочность рассчитывается по формуле:

$$\sigma_M^{\text{эксп}} = \frac{\sigma_M - \sigma_V \cdot V_V}{V_M}$$

Прочность матрицы при испытании рассчитывается по формуле:

$$\sigma_M = \frac{P_{\text{разр}}}{S}$$

Где

$\sigma_M$  – прочность матрицы

$\sigma_V$  – прочность волокна

$V_V$  – объемное содержание волокна (20%)

$V_M$  – объемное содержание матрицы (80%)

$P_{\text{разр}}$  - разрушающее усилие, Н  
 $S$  - площадь среза, мм<sup>2</sup>

## Выводы

- 1) Рассмотрены дефекты и их влияние на физико-механические характеристики ПКМ
- 2) Рассмотрены различные методы построения КЭ модели ПКМ с учётом развития дефекта в виде краевого эффекта торцов волокон на границе раздела волокно-матрица. Проанализированы современные подходы механики разрушения для аналитического моделирования деформационно-прочностных свойств полимерной композиционной *матрицы*.
- 3) Исследовано с помощью КЭ моделирования влияние дефекта на границе раздела фаз на деформационно-прочностные свойств стеклопластика и установлено, что предложенная в работе конечно-элементная модель стеклопластика содержащая дефект в виде краевого эффекта торцов волокон на границе волокно-матрица показала хорошую корреляцию с экспериментальными данными. Отклонения данных численного моделирования от экспериментальных соответственно равны:  $\sigma_x = 5,5\%$ ,  $\sigma_y = 5,3\%$ ,  $\tau_{xy} = 5,6\%$ .
- 4) Проведены экспериментальные исследования на физико-механические свойства стеклопластика при растяжении и сдвиге. Проверка модели на адекватность показала, что полученные данные достоверны. Полученная модель может быть использована для дальнейшего усовершенствования путем уточнения начальных условий, исключения допущений, а также оптимизации путем варьирования параметров.