

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

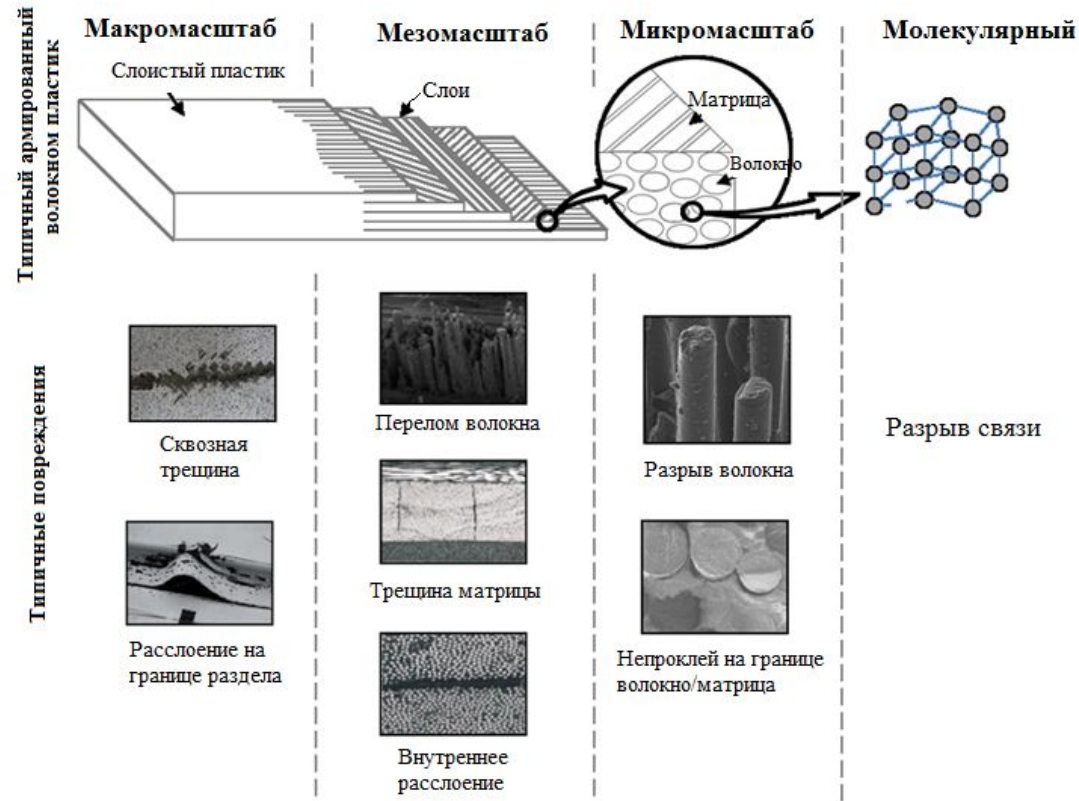
Схема основных уровней структуры армированных слоистых ПКМ и виды типичных повреждений на этих уровнях

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

Плотность, г/см³	2,55
Термический коэффициент линейного расширения, °С	0,0000049
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	1755—2215
Модуль упругости, МПа	70000
Относительное удлинение при растяжении, %	2—3
Диаметр волокна, мкм	4,5-9,6

Упругопрочностные свойства матричных полимеров

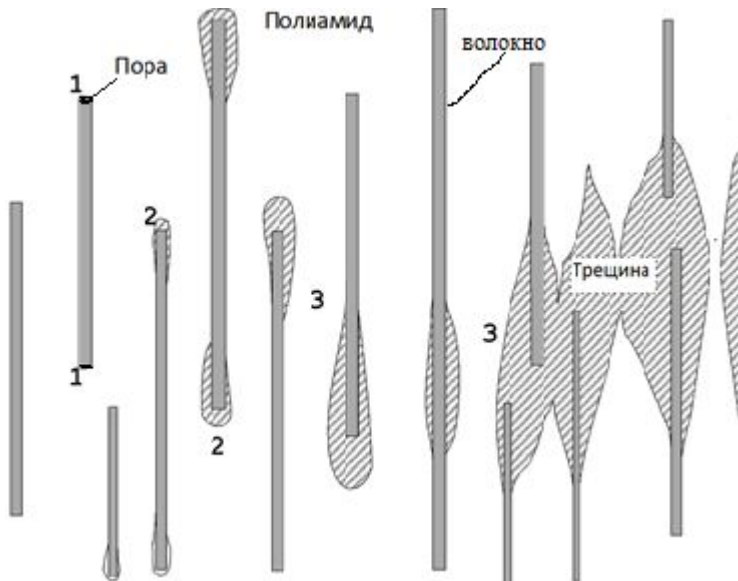
Тип термопласта	плотность, г/см ³	s ⁺ , МПа	E ⁺ , МПа	e ⁺ , %	s _{вн.} , МПа	E _{вн.} , МПа	G _{IC} , Дж/м ²	В. П., % масс. ²⁾
1. Полисульфон Udel P-1700, ПСН	1,24	70	2500	50-100	110	2700	1700	0,02
2. Полиэфирсульфон Victrex 200 P	1,37	86	2500	40-80	130	2600	1700	0,43
3. Полиарилсульфон Radel	1,29	72	2440	60	86	2300	-	1,8
4. Полифениленсульфид Fortron	1,36	80	3700	3-5	130	3800	1850-2440 ¹⁾	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 Xydar 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 ³⁾	-
13. ПА 6	1,13	50	2000	70-110	60-70	1900-2000		3,5

Влияние дефектов на прочностные характеристики ПКМ

Ударная прочность стеклонаполненных полиамидов при различных условиях нагружения

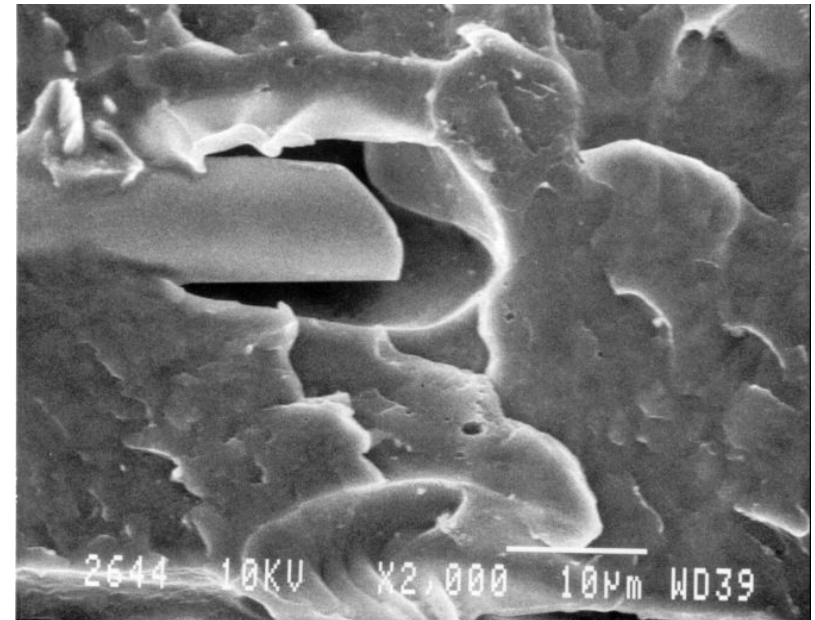
Ударная прочность стеклонаполненных полиамидов при различных условиях нагружения.												
Полиамид, исполь- зуемый в ка- честве связую- щего	Содержание стеклово- локна, % (вес)	Удельная ударная вязкость кгс·см ² см	Ударная вязкость по Изору, кгс·см		Разрывное напряжение при различных скорос- тях нагружения, МПа				Ударная вязкость при различных скоростях 2 нагружения кгс·см/см ²			
			с надре- зом	без на- дреза	0,13 см	2,54 см	1016 см	20320 см	0,13 см	2,54 см	1016 см	20320 см
			мин	мин	мин	мин	мин	мин	мин	мин	мин	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 стеклово- локом	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 стеклово- локом	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.

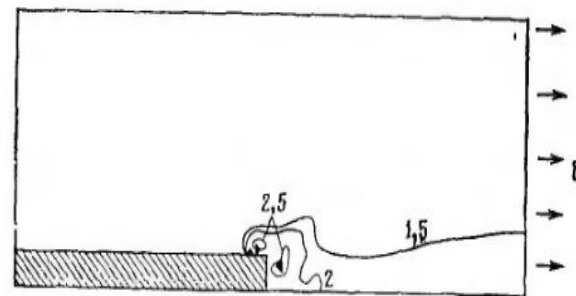
Одним из блоков является армирующее волокно.



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.

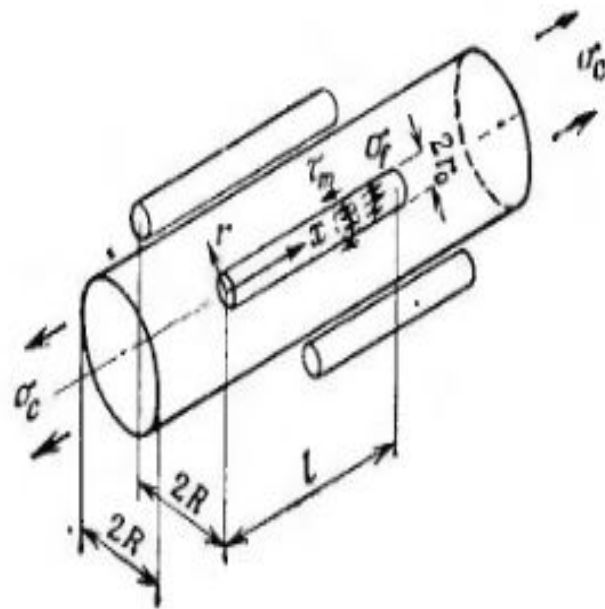
Модель Кокса.

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

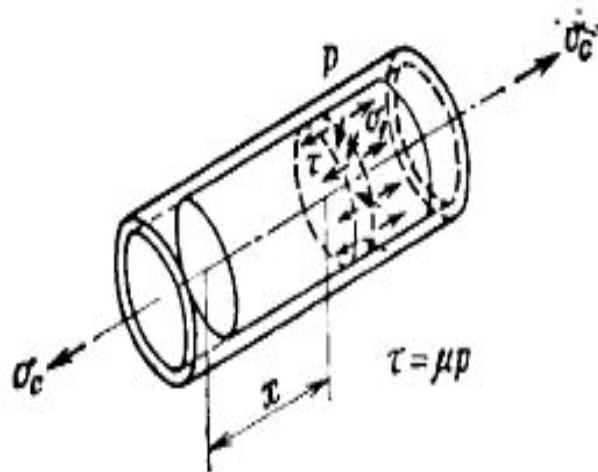
$$\tau_m = \frac{(E_f - E_m) r_f \beta \operatorname{sh} \beta (l/2 - x)}{2 \operatorname{ch} (\beta l/2)},$$

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

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



Модель Аутоутер

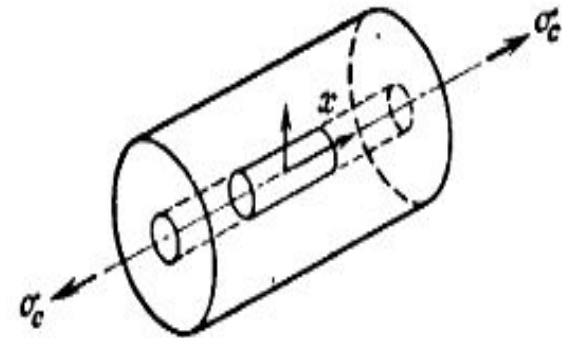


$$\sigma_l = \mu \frac{\sigma_{my} t}{r_0^2} x,$$

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

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

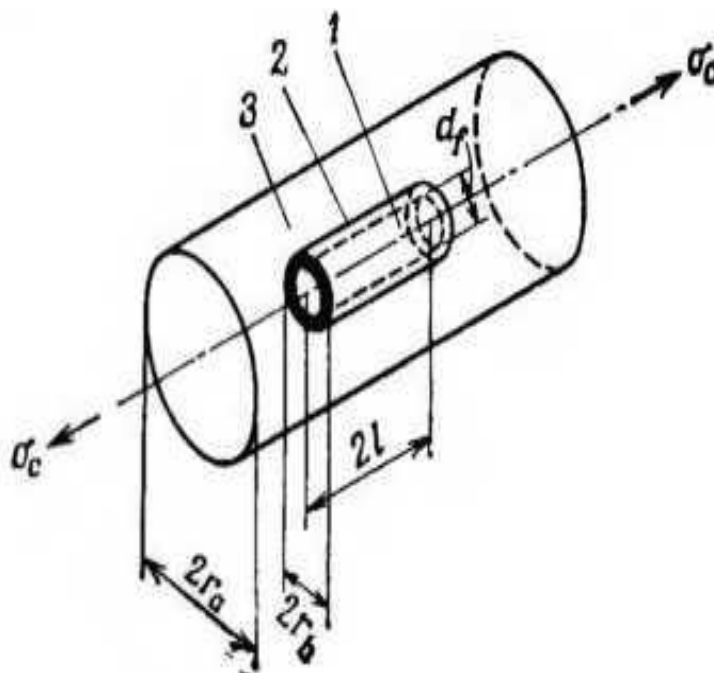
Модель Дау



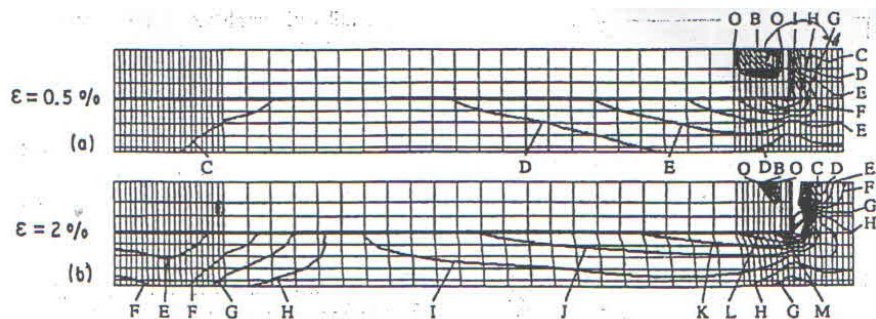
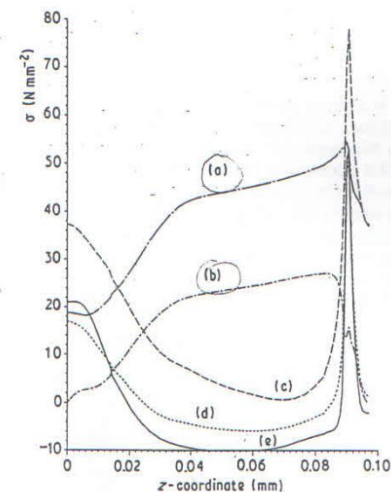
$$\sigma_l = \frac{P_m}{A_f + A_m (E_m/E_f)} \left[1 - \frac{\text{ch}(\lambda x/d_f)}{\text{ch}(\lambda l/d_f)} \right],$$

где λ — 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

[illegible]

12

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

Задачи работы:

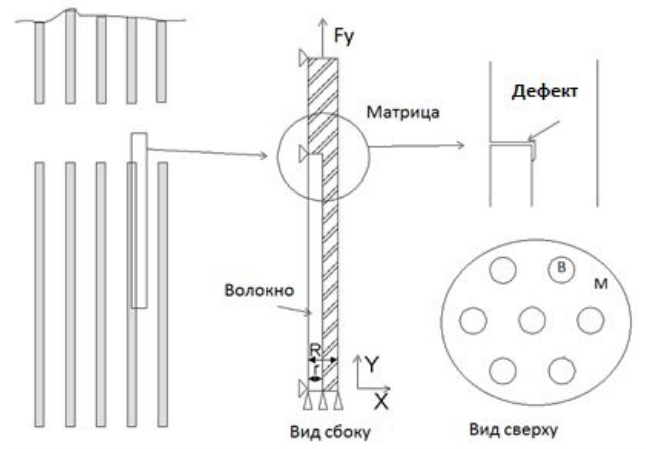
- 1) Провести анализ литературных данных по дефектам и их влиянию на физико-механические свойства ПКМ, армированных короткими волокнами.
- 2) Разработать физическую модель структуры ПКМ с дефектом на торцах армирующих волокон.
- 3) Разработать КЭ-модель такого ПКМ и методик построения этой модели в программном 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 μ	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.

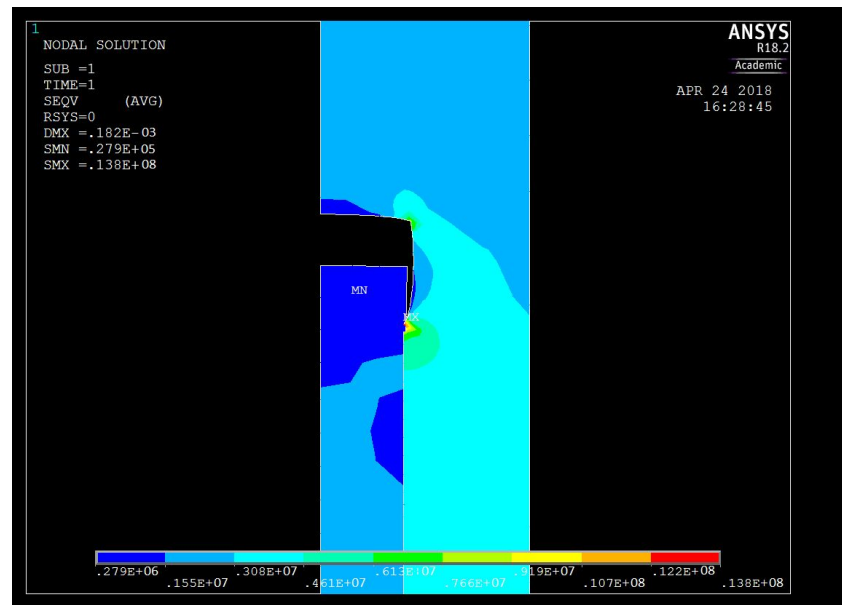
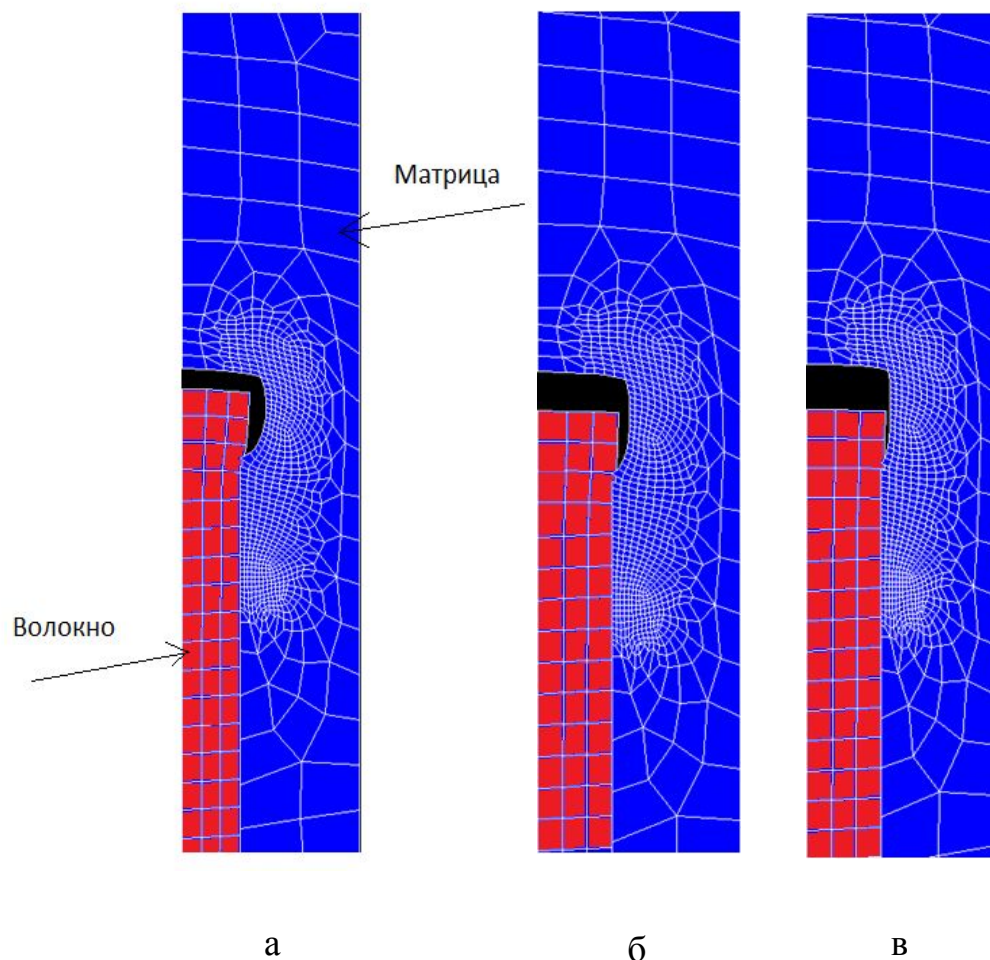
3.2. Методика построения КЭ модели развития дефекта на границе раздела фаз.

Методика построения конечно-элементной модели
(КЭ)

в программном комплексе ANSYS:

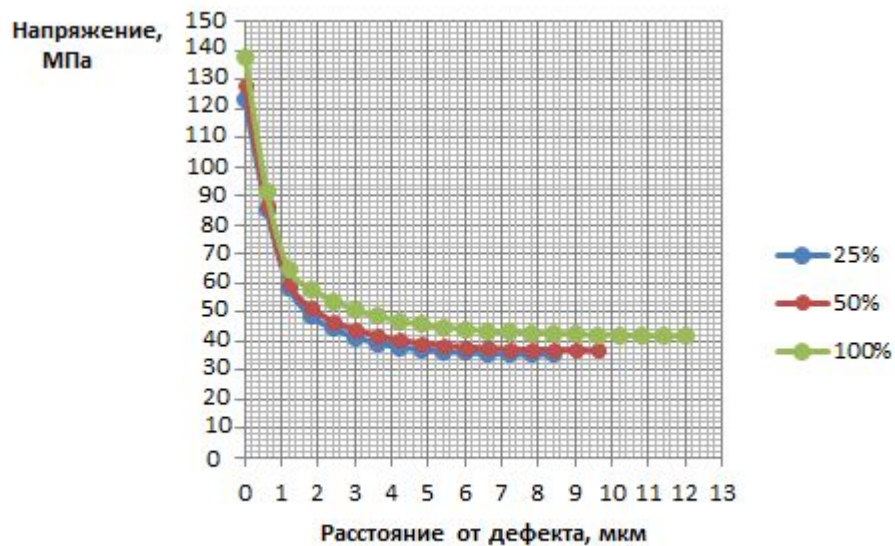
- 1) Постановка задачи
- 2) Назначение типов конечных элементов и их особенности
- 3) Определение свойств материала модели
- 4) Задание упругих констант для стеклянного волокна
- 5) Создание геометрической модели
- 6) Присвоение свойств блокам волокна и матрицы
- 7) Разбиение модели на конечные элементы (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.

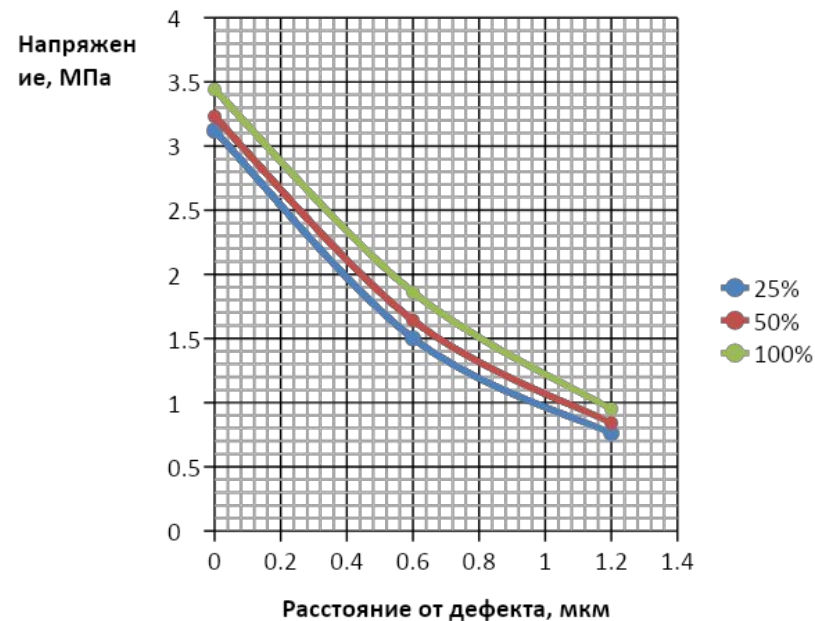


Напряжённое состояние модели

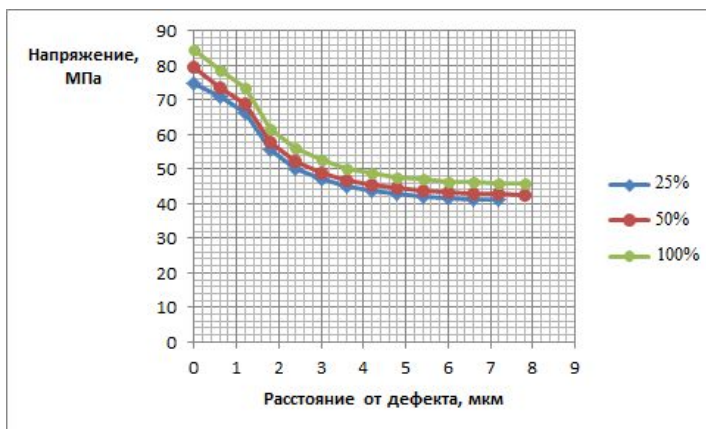
Деформированное состояние стеклопластика а— 25%, б — 50%, в- 100% от разрушающей деформации волокна



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



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



Нормальные напряжения σ_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
6-7,2х1х2-80

Параметр	Значение
Линейная плотность μ	14,5
Разрывная нагрузка, Н	10,0
Предел прочности $\sigma_{\lambda'}$, ГПа	4,2
Предел прочности σ_y , ГПа	2,1
Модуль упругости E_y , ГПа	95
Модуль упругости E_x , ГПа	50
Плотность ρ , кг/м ³	2560

Характеристики
поликапроамида
(Полиамид 6)

Наименование показателя	Величина
Плотность, кг/м ³	1150-1160
Температура плавления, °C	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
Сопротивление ударной нагрузке (ударная вязкость), без надреза, кДж/м ²	не разрушаются
Модуль упругости, ГПа	2,3-2,4

Схема изготовления образца стеклопластика

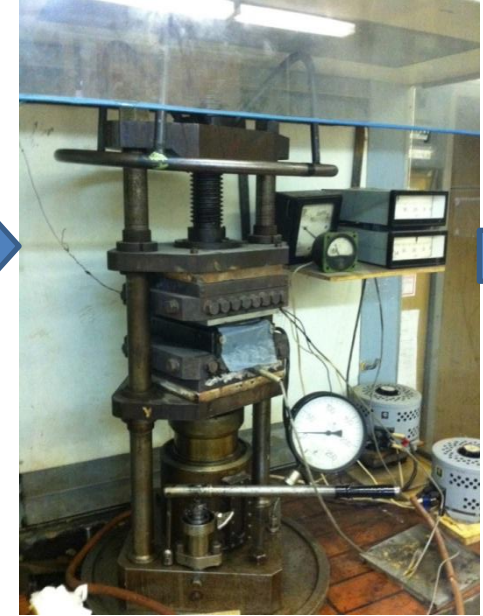
1



2



3-4



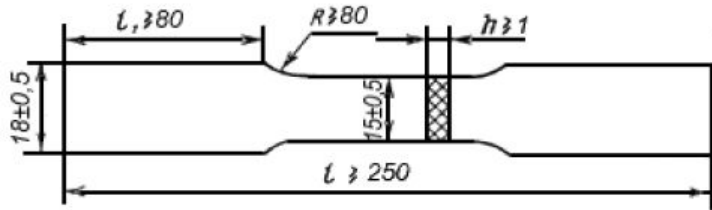
5

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:

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

где

σ^+ -предельная прочность на растяжение, МПа

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

A – средняя площадь поперечного сечения, мм²

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

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

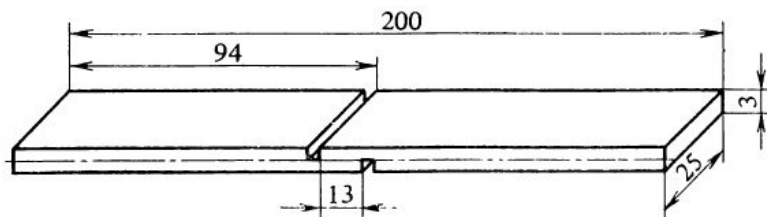
где E – модуль упругости при растяжении, ГПа

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

$\Delta \epsilon$ - 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

τ – прочность при межслоевом сдвиге,
МПа

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

F – площадь среза, мм²

Сравнение результатов экспериментов и численного моделирования.

Параметр	Моделирование	Экспериментальные данные	Отклонение, %
Нормальное напряжение σ_x , МПа	85	80,2±4,1	5,5
Напряжение σ_y , МПа	138	130,6±13,65	5,3
Сдвиговое напряжение τ_{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

σ_m – прочность матрицы

σ_v – прочность волокна

V_v – объемное содержание волокна (20%)

V_m – объемное содержание матрицы (80%)

$P_{\text{разр}}$ - разрушающее усилие, Н
 S - площадь среза, мм²

Вывод ы

- 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.