

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Аэрокосмический факультет
Кафедра «Техническая механика»
Направление 15.04.03 «Прикладная механика»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, д.т.н.

_____ (С.В.Махнович)

_____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ С.Б.Сапожников

_____ 2017 г.

Учет микромеханических аспектов деформирования и разрушения волокнистых
композиционных материалов при оценке прочности конструкции

наименование темы

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)
ЮУрГУ–15.04.03.2017.011 ПЗ ВКР

Руководитель проекта, д.т.н., проф.

_____ (С.Б. Сапожников)

_____ 2017 г.

Автор проекта

студент группы _____ П-235 _____

_____ (А. А. Шаблей)

_____ 2017 г.

Нормоконтролёр, к.т.н., доцент

_____ (Ю.Н. Ребяков)

_____ 2017 г.

Челябинск 2017

АННОТАЦИЯ

Шаблей А.А. Учёт микромеханических аспектов деформирования и разрушения волокнистых композиционных материалов при оценке прочности конструкции. – Челябинск: ЮУрГУ, Аэрокосмический факультет; 2017, 62 с. 34 ил., список использованной литературы – 45 наименований.

Объектом исследования данной магистерской диссертации является: многослойный стеклопластик, составленный из однонаправленных слоев, испытывающих монотонное квазистатическое растяжение вплоть до разрушения.

Цель магистерской диссертации: получение диаграммы деформирования многослойного стеклопластика с учетом накопления рассеянных микрповреждений на микро-, мезо- и макроуровнях.

Результаты, полученные в рамках выполнения диссертации:

- На основании исследования напряженного состояния (НС) при помощи метода конечных элементов (МКЭ) рассмотрено накопление микрповреждений в структуре однонаправленного стеклопластика.
- Показана возможность образования трещиноподобных дефектов и накопление микрповреждений в структуре однонаправленного стеклопластика, существенно снижающих жесткость слоя, волокна в котором расположены перпендикулярно направлению нагружения.
- Предложена схема замещения микромоделей упрощенной мезомоделью с использованием распределения Мотта, позволяющей адекватно отразить изменение жесткости слоя при нагружении.
- На примере растяжения слоистой пластины с отверстием рассмотрено накопление повреждений и разрушение с использованием МКЭ.

					<i>ЮУрГУ – 15.04.03.2017.011 ПЗ ВКР</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Шаблей А.А.</i>			<i>Учёт микромеханических аспектов деформирования и разрушения волокнистых композиционных материалов при оценке прочности конструкции</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Пров.</i>		<i>Сапожников С.Б.</i>				6	62	
<i>Н.контр.</i>		<i>Редяков Ю.Н.</i>			<i>Кафедра ТМ</i>			
<i>Утв.</i>		<i>Сапожников С.Б.</i>						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	12
1.1 Существующие структурные модели материалов	12
1.1.1 Модель упругого поведения с хрупким разрушением	13
1.1.2 Модель с накоплением рассеянных микрповреждений	13
1.2 Микроструктура однонаправленного волокнистого композита (ОВКМ) 14	
1.3 Механические характеристики стеклопластиков	16
1.4 Проблемы оценки конструкционной прочности композитных материалов 20	
1.5 Изучение накопления микрповреждений в ОВКМ	21
1.6 Моделирование накопления микрповреждений в ОВКМ	23
1.7 Постановка задачи	25
2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	26
2.2 Моделирование геометрии структуры ОВКМ	27
2.2.1 Типы расчетных моделей ОВКМ	27
2.2.2 Микро-, мезо- и макро моделирование структуры ОВКМ в пакете ANSYS Workbench	27
2.2.2.1 Микро моделирование	27
2.2.2.2 Мезо моделирование	29
2.2.2.3 Макро моделирование	30
2.3 Назначение внутренних параметров компонентов моделей ОВКМ	31

2.3.1	Назначение внутренних параметров компонентов микромоделей и мезомоделей ОВКМ	31
2.3.2	Назначение внутренних параметров компонентов макромоделей в программном пакете FarGr	35
2.4.1	Моделирование нагружения микромоделей	38
2.4.2	Моделирование нагружения мезомоделей.....	40
3	ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НА КОНСТРУКТИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ – ПЛАСТИНЕ С ОТВЕРСТИЕМ ИЗ ОВКМ	52
4	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	58

ВВЕДЕНИЕ

Типовые детали в изделиях, предназначенных для продолжительной эксплуатации (десятки лет), изготавливают в настоящее время, как правило, из традиционных металлических материалов, которые в расчетных схемах считают изотропными и упругими. В качестве предельно допустимых напряжений используют предел выносливости, соответствующий известной программе нагружения. Требования к повышению весовой эффективности (снижение массы изделий) уже давно не обсуждаются в авиационно-космической технике, а в последнее десятилетие они стали остро актуальны и для изделий наземных транспортных систем. Приведем примеры в ЮУрГУ: проекты энергосберегающего модульного трамвая с широким использованием стеклопластика в несущих сэндвич-конструкциях, скоростного плавающего броневедомоцикла с корпусом из композитных материалов, автомобиля формулы «Студент» и др. Здесь термин «энергосберегающий» является ключевым, так как снижение массы трамвая или автомобиля приводит к снижению расхода топлива (экономическая эффективность), увеличению пробега на одной заправке (технологическая эффективность) и к снижению выбросов углекислого газа в атмосферу (экологическая эффективность).

Следует отметить, что современные высокопрочные и легкие композитные материалы (стекло-, угле- или органопластики) существенно дороже стали и алюминиевых сплавов, проявляют свойства упругой и прочностной анизотропии, имеют нелинейность деформирования и сравнительно малые (по сравнению с металлами) деформации разрушения. В типовых композитах, составленных из чередующихся слоев с ортогональными направлениями укладки волокон (структуры типа $0_m/90_n$, где m и n – число соответствующих слоев), пределы пропорциональности в 2-3 раза ниже пределов прочности. Это обусловлено появлением микротрещин в слоях с волокнами, ориентированными под углом 90° к направлению нагружения, т.е. низкой трансверсальной прочностью однонаправленных волокнистых композитных материалов (ОВКМ).

					<i>ЮУрГУ – 15.04.03.2017.011 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		9

Из этого факта следует, что, если в расчетах на прочность не допускать появления трансверсальных микротрещин, то выигрыш в массе конструкций с применением композитов по сравнению с металлическими будет несущественным.

Таким образом, расчет напряженного состояния слоистых композитных конструкций осложняется необходимостью корректного учета микрповреждений в слоях, снижением общей жесткости, появлением физической нелинейности. К сожалению, в коммерческих пакетах, реализующих метод конечных элементов, для моделирования композитов имеются лишь анизотропные, но идеально упругие и разрушающиеся внезапно материалы. Накопления рассеянных микрповреждений пока нет [1, 2].

Прогресс в этом деле затрудняется отсутствием признанных феноменологических моделей накопления микрповреждений по различным механизмам (поперек волокон, вдоль, на сдвиг) в конечных элементах типа SOLID или SHELL для объемного напряженного состояния. Построение таких моделей – процесс пока идущий, подтверждением тому проект WWFE-II (world-wide failure exercise), в котором в 2004-2008 гг. по заказу Министерства обороны Великобритании соревновались научные коллективы со всего мира по предсказанию прочности композитов при трехосном напряженном состоянии. Итогом этого проекта было заключение о *необходимости учета микрповреждений в матрице, волокнах и на границе раздела*. Был дан старт следующему проекту – WWFE-III, в котором фокус был сделан именно на учете микрповреждений и который длился с 2008 по 2014 годы и формально завершился признанием необходимости продолжения исследований, т.е. незрелость имеющихся подходов.

На ряде последних конференций по композитным материалам признавалось, что в небольших объемах (типа образцов для механических испытаний) можно в явном виде учесть неоднородное расположение волокон в микроструктурных моделях, учесть разброс их механических свойств по объему,

чтобы предсказать накопление микрповреждений, плавно меняющих жесткость образцов в процессе нагружения вплоть до разрушения. Однако применять такие модели для расчетов реальных крупногабаритных конструкций невозможно из-за их чрезвычайной численной «тяжести» [3].

Делался вывод, что необходимы новые идеи, которые позволят на существующих вычислительных мощностях решать практические задачи по оценке кинетики деформирования и разрушения конструкций с учетом наблюдаемых на практике механизмов микрповреждения с приемлемой точностью.

Таким образом, целью данной работы является попытка построения непротиворечивого алгоритма перехода от микроструктурной, максимально детализированной модели деформирования и разрушения ОВКМ, к мезоструктурной модели, в которой сплошной однородный анизотропный материал слоя ОВКМ имеет возможность накапливать микрповреждения, *со снижением размерности задачи на несколько порядков.*

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Существующие структурные модели материалов

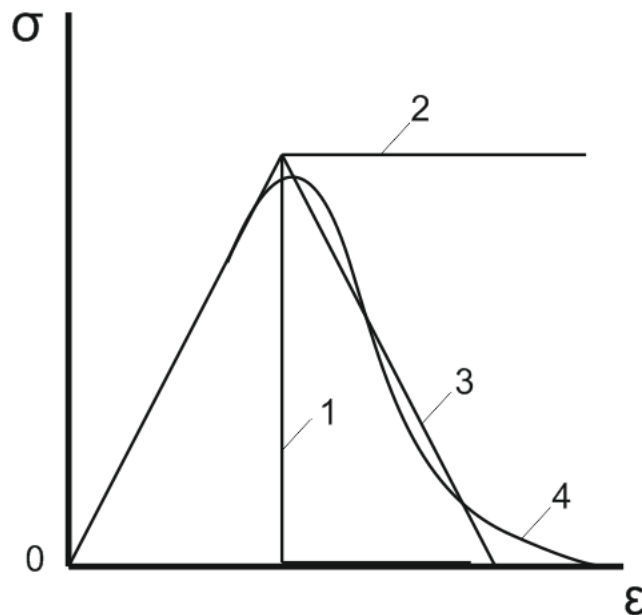


Рисунок 1 – Схематизация диаграммы деформирования монослоя

На данный момент существует достаточно большое количество данных по исследованиям деформирования и разрушения композитных материалов [4-11].

Из работ зарубежных авторов следует, что при рассмотрении вопросов деформирования и прочности композитов при статическом нагружении и однородном НДС оценка прочности слоистых композитов при плоском НДС может быть проведена с использованием по меньшей мере трех различных подходов, отличающихся степенью детализации процессов разрушения:

- макроподход - использование критериальных зависимостей для композита в целом как анизотропного однородного материала. В этом случае материал считают хрупким, разрушающимся мгновенно при достижении предельного НДС (рисунок 1, кривая 1);

- мезоподход - использование критериальных зависимостей прочности для монослоев, причем разрушением материала считается достижение критического НДС в одном из слоев (материал слоя - упругий, хрупкий);

- микроподход - использование критериальных зависимостей прочности для монослоя и предположений о посткритическом поведении монослоя (изменение жесткостных характеристик) - после достижения в нем критического состояния (разрушение рассматривается как процесс, гипотеза идеальной хрупкости монослоя не используется, вводятся различные варианты накопления повреждений в монослоях - от систем трещин, расположенных перпендикулярно волокнам, и развивающихся ступенями - рисунок 1, кривая 2, до накопления рассеянных микроповреждений, изменяющихся постепенно - псевдопластически или иным образом, кривые 3, 4).

1.1.1 Модель упругого поведения с хрупким разрушением

Упругое поведение вплоть до разрушения – это простейшая модель, имеющая принятое название модели “first ply failure”, предложенной S.W.Tsai в 60-х годах 20 века (рисунок 1, кривая 1). Эта модель широко использовалась в расчетах авиационных конструкций и требовала отсутствия повреждений микроструктуры композита в эксплуатации. При оценке прочности каждого слоя в композите рассчитывали значение тензорно-полиномиального критерия прочности и требовали, чтобы его величина не превосходила 1 ни для одного из слоев в пакете.

Такой подход был весьма консервативен и практически не давал преимуществ композитам перед алюминиевыми сплавами.

1.1.2 Модель с накоплением рассеянных микроповреждений

Уже в 70-х годах 20 века стали рассматриваться модели поведения слоистого композита, допускавшие работу слоев после достижения в них предела прочности (post-failure analysis). Здесь полагали наличие кинематического нагружения слоев в составе слоистого пакета и либо

					<i>ЮУрГУ – 15.04.03.2017.011 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		13

«псевдопластическое течение» с неизменными напряжениями [1, 12]., либо линейное разупрочнение (модель Sandhu [13]). Последняя модель давала вполне реалистичные прогнозы посткритического (при напряжениях выше предела пропорциональности) деформирования слоистого композита, однако требовала введения дополнительной константы – модуля разупрочнения, определение которого было предметом сложных экспериментов и аппроксимаций [14- 17].

Анализ [18] показал, что постепенное накопление микроповреждений можно учитывать уже с малых деформаций и не разграничивать упругое и посткритическое поведение. Тогда удастся рассматривать деформирование слоистого композита как один непрерывный процесс. Важно лишь корректно сформулировать функции микроповреждаемости, определяющие изменение квазиупругих констант слоев (секущих или касательных модулей) от напряжений или деформаций. В работе [18] это сделано на основе концепции параллельного соединения элементарных ячеек.

1.2 Микроструктура однонаправленного волокнистого композита (ОВКМ)

В первом приближении композиционный материал можно рассматривать как совокупность материалов с различными свойствами (смола + ткань, смола + стекло, бетон + металл и т.д.). При расчетах конструкций на прочность, долговечность и живучесть такой подход применяется с учетом коэффициентов запаса, в которые закладываются возможные несовершенства расчета, но не учитывается внутреннее строение и возможные несовершенства материала. Чем точнее будет предсказан ресурс материала, тем эффективнее его можно будет использовать, но, в таком случае, требуется глубже изучить его природу и структуру. В частности, в области кристаллофизики уже довольно продолжительное время ведутся исследования, которые помогут оценивать прочность кристаллов на молекулярном уровне, создавать металлы с

минимизированным числом дефектов, а, следовательно, с гораздо более высокими свойствами.

На первый взгляд, может показаться, что волокна в композите расположены так, что их направления и расстояния между ними одинаковы по всей длине материала. На самом деле, при рассмотрении микроструктуры ОВКМ можно обнаружить что даже диаметры самих волокон различны, не говоря уже о расстояниях между ними (Рисунок 2) [19].

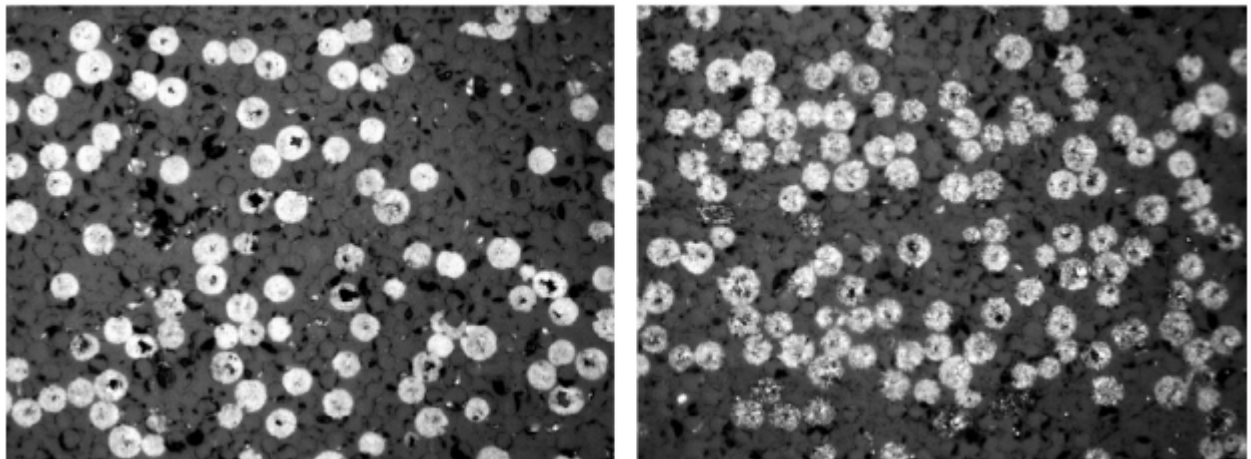


Рисунок 2 – Микроструктура ОВКМ

1.3 Механические характеристики стеклопластиков

Стеклопластик представляет собой композиционный материал, в состав которого входит стеклянный наполнитель и синтетическое полимерное связующее. Стеклянные волокна являются наиболее массовыми в производстве композиционных материалов. На Рисунок 3 представлены различные виды стекловолокнистых наполнителей, выпускаемых в промышленных масштабах.

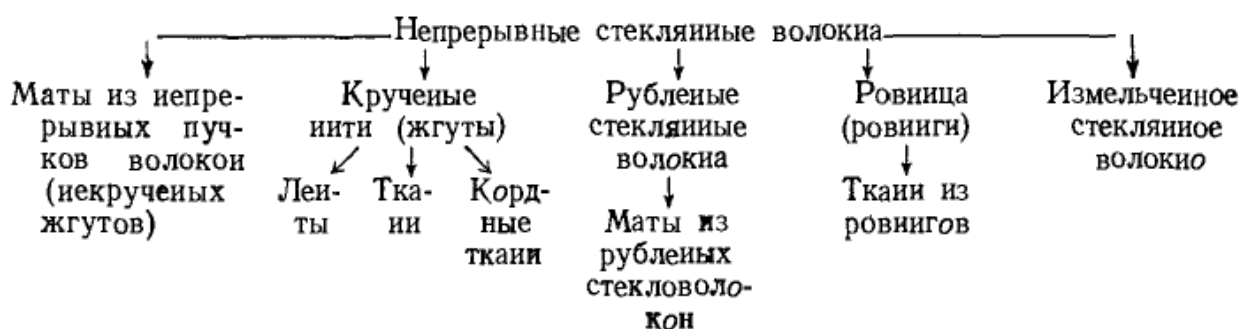


Рисунок 3 – Различные типы стекловолокнистых наполнителей

В качестве связующего выступают полиэфирные, фенолоформальдегидные (фенольные), меламиноформальдегидные (меламиновые), эпоксидные и кремнийорганические смолы, а также полиамиды, алифатические полиамиды, поликарбонаты и др. [20].

К армированным композитам принято относить материалы искусственного происхождения сложного состава, имеющие не менее двух непрерывных фаз с общей границей раздела. Одна из фаз называется матрицей, она отвечает за форму изделия, устойчивость композита к воздействию различных агрессивных сред, тепло- и морозостойкость, ударную прочность и другие свойства.

Связующее - это полимерная основа, из которой после соответствующей обработки образуется матрица. Важные характеристики связующего – технологические: вязкость, смачивающая способность, живучесть и др.

Второй обязательной фазой композиционного материала является армирующий наполнитель, частицы которого должны иметь длину не менее критической l_k , при которой может быть реализована прочность волокна. Критическая длина волокна зависит от его диаметра d , прочности при разрыве σ_b , прочности при сдвиге $\tau_{сдв}$. на границе раздела «волокно - матрица» и может быть рассчитана по уравнению [21]:

$$l_x = (\sigma_b d) / 2 \tau_{сдв} . \quad (1.3)$$

Большую роль в формировании свойств композиционного материала играет межфазный слой на границе раздела матрицы и армирующей фазы. Подсчитано, что площадь контакта между ними в 1 мм³ композита с содержанием волокна 50 % по объему составляет 450-600 мм².

Наибольшее применение в качестве связующего стеклопластиков находят ненасыщенные полиэфирные смолы благодаря низкой стоимости и высокой технологичности. Свойства стеклопластиков на основе полиэфирных связующих приведены в таблице 1.1.

Роль матрицы, сформированной из связующего, чрезвычайно велика. Благодаря ее непрерывности и адгезионной связи с наполнителем прилагаемые к композиту напряжения распределяются по всему объему материала и воспринимаются высокопрочными волокнами.

Стеклопластики на основе полиэфирных смол можно эксплуатировать до 60-150°C, эпоксидных - до 80-200°C, феноло-формальдегидных - до 150-250°C, полиимидов - до 200-400 °C. Диэлектрическая проницаемость стеклопластиков 4-14, тангенс угла диэлектрических потерь 0,01-0,05, причём при нагревании до 350-400°C показатели более стабильны для стеклопластиков на основе кремнийорганических и полиамидных связующих.

1. Таблица 1.1 - Свойства стеклопластиков на основе полиэфирных связующих [22]

Наименование показателя	Единица измерения	Полиэфирные смолы
Плотность	г/см ³	1,4 - 1,75
Прочность при растяжении	МПа	140 - 450
Прочность при статическом изгибе	МПа	150 - 500
Прочность при сжатии	МПа	150 - 300
Модуль упругости при растяжении	ГПа	11 - 25

Для стеклопластиков характерно сочетание высоких прочностных, диэлектрических свойств, сравнительно низкой плотности и теплопроводности, высокой атмосферо-, водо- и химстойкости. Механические свойства стеклопластиков определяются преимущественно характеристиками наполнителя и прочностью связи его со связующим, а температуры переработки и эксплуатации стеклопластика - связующим. Наибольшей прочностью и жёсткостью обладают стеклопластики, содержащие ориентированно расположенные непрерывные волокна. Такие стеклопластики подразделяются на однонаправленные и перекрёстные; у стеклопластика первого типа волокна расположены параллельно, у стеклопластика второго типа - под заданным углом друг к другу, постоянным или переменным по изделию. Изменяя ориентацию волокон, можно в широких пределах регулировать механические свойства стеклопластиков.

Большой изотропией механических свойств обладают стеклопластики с неориентированным расположением волокон: гранулированные и спутанно-волокнистые пресс-материалы; материалы на основе рубленых волокон, нанесённых на форму методом напыления одновременно со связующим, и на основе холстов (матов). Хаотически армированные стеклопластики являются более дешёвым материалом, чем однонаправленные и широко используются для изготовления малонагруженных деталей внутренней облицовки автобусов, троллейбусов, вагонов метро и электропоездов благодаря своим антивандальным

свойствам, устойчивости к воздействию ультрафиолетовых лучей, воды и других сред, а также высокой огнестойкости [23].

Стеклопластик на основе непрерывных волокон получил более широкое распространение, чем хаотически армированный, поскольку механические свойства последнего низкие и изучены слабо. Следовательно, на практике в качестве материала ответственных элементов конструкций применяется именно стеклопластик на основе непрерывных волокон.

					<i>ЮУрГУ – 15.04.03.2017.011 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		19

1.4 Проблемы оценки конструкционной прочности композитных материалов

Зарубежные исследователи отмечают, что характер разрушения композиционных материалов и их поведение при различных типах нагрузок изучено не до конца и, порой, труднопредсказуемо. В свою очередь, именно предсказание поведения материала является одним из ключевых факторов правильного проектирования конструкций. В настоящее же время механика разрушения может предсказывать поведение металлов, но не композитов, так как они обладают рядом существенных отличий, основным из которых является анизотропия свойств.

В современных исследованиях прочности композитных материалов учёные, наряду с экспериментальными, применяют конечно-элементные методы [24] [25].

					<i>ЮУрГУ – 15.04.03.2017.011 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		20

1.5 Изучение накопления микрповреждений в ОВКМ

Механизмы разрушения композитов имеют свои особенности. Отмечается, что первым повреждением, возникающим в слоистых композитах, обычно являются микротрещины в матрице, которые расслаивают ее, проходя перпендикулярно или параллельно волокнам. Наиболее распространенным видом микротрещин является растрескивание 90° слоев под действием нагрузки в 0° направлении. Эти микротрещины проходят поперек направления приложения нагрузки, поэтому их называют поперечными трещинами [26].

Микротрещины могут наблюдаться при монотонном и усталостном нагружении, при изменении температуры, при ударах и т.п. Микротрещины могут образовываться в любых слоях, но они появляются преимущественно в слоях, волокна в которых направлены поперек приложенной нагрузки. Непосредственное влияние микротрещин проявляется в снижении термомеханических свойств слоистого композита, включая изменения всех модулей, коэффициентов Пуассона, и коэффициентов теплового расширения.

Если заданная конструкция не может выдерживать образование микротрещин, вызывающих снижение свойств материала, то образование микротрещин является ошибкой проектирования. Вторичное влияние микротрещин заключается в том, что они являются зародышами других форм повреждений. Например, микротрещины могут вызвать расслоения, повреждения волокон или предоставить пути для проникновения агрессивных жидкостей в структуру материала. Такие режимы повреждения могут впоследствии привести к разрушению слоистого композита.

В работах испанских ученых из института IMDEA Materials (C.Gonzales et al.) разрабатывались численные модели слоистых композитов со случайным расположением волокон в слоях [27-29]. На основе пакета ABACUS ими были созданы модели разрушения таких слоев в квазистатической постановке для прогнозирования прочности слоистых материалов различной структуры при

простых программах нагружения, но к расчету реальных конструкций в микромеханической постановке они пока не приступили.

					<i>ЮУрГУ – 15.04.03.2017.011 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		22

1.6 Моделирование накопления микрповреждений в ОВКМ

Подход, схожий с тем, что планируется использовать в данной работе, уже был описан в статье Д.Триаса с соавт. «A two-scale method for matrix cracking probability in fibre-reinforced composites based on a statistical representative volume element»[30]. В данной работе авторы представили методику вычисления вероятности разрушения матрицы волокнистого композита при помощи разбиения материала на элементарные ячейки. Были построены конечноэлементные модели микроструктуры материала и произведены расчеты для различных граничных условий. В результате были получены функции плотности вероятности повреждения материала. Эти распределения вероятности можно применять и к макромоделям в расчетах на надежность совместно с различными критериями разрушения.

Вообще, элементарные ячейки объема достаточно часто применялись для моделирования композитов. Такой подход использовался еще с 70х годов, так как укладка волокон в композитах предполагалась более или менее периодичной, что позволяло выделить элементарную ячейку объема [31, 32]. Тем не менее, в некоторых работах указано, что случайное распределение армирующей составляющей композиционного материала может иметь влияние на его эффективные (осредненные) свойства [33, 34], прочностные свойства [35] и упруго-пластические свойства [36, 37].

В предположении идеально упругого, хрупкого поведения вплоть до разрушения трансверсально-изотропные материалы в трехмерном пространстве однозначно характеризуются девятью константами, которые включают в себя упругие константы и критерии прочности (растяжение, сжатие и сдвиг в осях x , y и z).

Распределение микрповреждений в расчетных моделях косвенно задается при помощи константы γ , которая определяет разброс значений деформаций (напряжений или др.) при разрушении в распределении Мотта (Рисунок 4), которое используется для определения дисперсии разрушающих

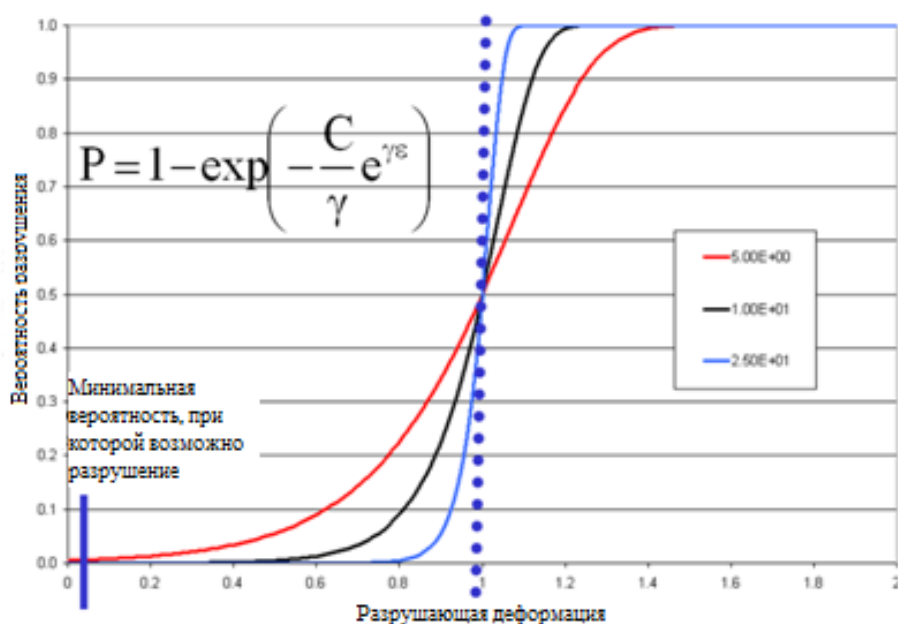


Рисунок 4 – Распределение Мотта в пакете ANSYS

напряжений или деформаций [38, 39]. Это распределение близко к распределению Вейбулла, но выражается более просто. Константа C определяется из условия равенства $P=0,5$ при $\varepsilon=1$ (номинальное значение критериального параметра).

1.7 Постановка задачи

На основе анализа материалов, приведенных в обзоре литературы, можно сформулировать основную цель магистерской диссертации: получить диаграмму деформирования многослойного стеклопластика с учетом накопления рассеянных микрповреждений на микро-, мезо- и макроуровнях. Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих основных задач с использованием пакетов ANSYS Mechanical и Solid Works:

- На основании исследования напряженного состояния (НС) при помощи метода конечных элементов (МКЭ) рассмотреть накопление микрповреждений в структуре однонаправленного стеклопластика.
- Показать возможность образования трещиноподобных дефектов и накопление микрповреждений в структуре однонаправленного стеклопластика, существенно снижающих жесткость слоя, волокна в котором расположены перпендикулярно направлению нагружения.
- Предложить схему замещения микромоделей упрощенной мезомоделью с использованием распределения Мотта, позволяющей адекватно отразить изменение жесткости слоя при нагружении.
- На примере растяжения слоистой пластины с отверстием рассмотреть накопление повреждений и разрушение с использованием МКЭ.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе предложена схема замещения микромоделей упрощенной мезомоделью, с использованием распределения Мотта, и макромоделью, позволяющими адекватно отразить изменение жесткости слоя при нагружении, в которой учтен фактор случайного разброса дефектов в материале.

Микромодель, по своим характеристикам приближена к реальному ОВКМ, неоднородность свойств в ней задана на этапе геометрического моделирования при помощи неоднородности укладки волокон в матрице и их различных диаметров. Волокна и матрица в микромоделей представлены в виде Solid-элементов. Такое представление позволит моделировать разрушение композита с учетом накопления рассеянных микроповреждений в процессе нагружения.

В мезомодели исследуемый средний 90° слой представляет из себя геометрически однородную структуру, свойства которого, исходя из наших предположений, аналогичны соответствующему слою микромоделей, поскольку заданы на основании виртуальных испытаний, проведенных с микромоделью. Мезомодель так же построена при помощи Solid-элементов.

Макромодель представляет из себя математическую модель, в которой разброс характеристик описывается нормальным законом распределения [18].

Таким образом, усложняя геометрическую сторону задачи, на этапе испытаний микромоделей, мы получили механические свойства мезомодели, которые в дальнейшем использовались для расчетов. Благодаря такому подходу, модель получилась простой и размерность задачи многократно уменьшилась.

2.2 Моделирование геометрии структуры ОВКМ

2.2.1 Типы расчетных моделей ОВКМ

Расчетные модели можно условно разделить на три группы: микро-, мезо- и макромоделли. Отличаются они друг от друга геометрическими параметрами, структурой и способом задания свойств материала. Подробнее данные модели и их свойства описаны ниже.

2.2.2 Микро-, мезо- и макро моделирование структуры ОВКМ в пакете ANSYS Workbench

Для получения свойств мезомодели, которые в дальнейшем будут заложены в расчет, требовалось провести ряд испытаний микромоделей, со случайной структурой. Для этого сперва необходимо было сформировать их геометрию.

2.2.2.1 Микро моделирование

Алгоритмы для моделирования микро структуры уже использовались ранее [40-44]. В данной работе геометрия микро модели создана при помощи программы CM (разработчики Л.В.Шипулин, А.В.Игнатова, (Рисунок 5)), позволяющей составить набор команд в виде текстового файла *.lgn для построения двумерной геометрии фиксированной толщины в пакете ANSYS. В этой программе можно задать необходимые геометрические параметры образца, диаметры волокон, минимальное расстояние между волокнами, объемную долю волокон в материале, коэффициент вариации – степень случайного разброса укладки волокон по толщине 90° слоя, а также тип упаковки волокон в образце для регулярной сетки волокон.

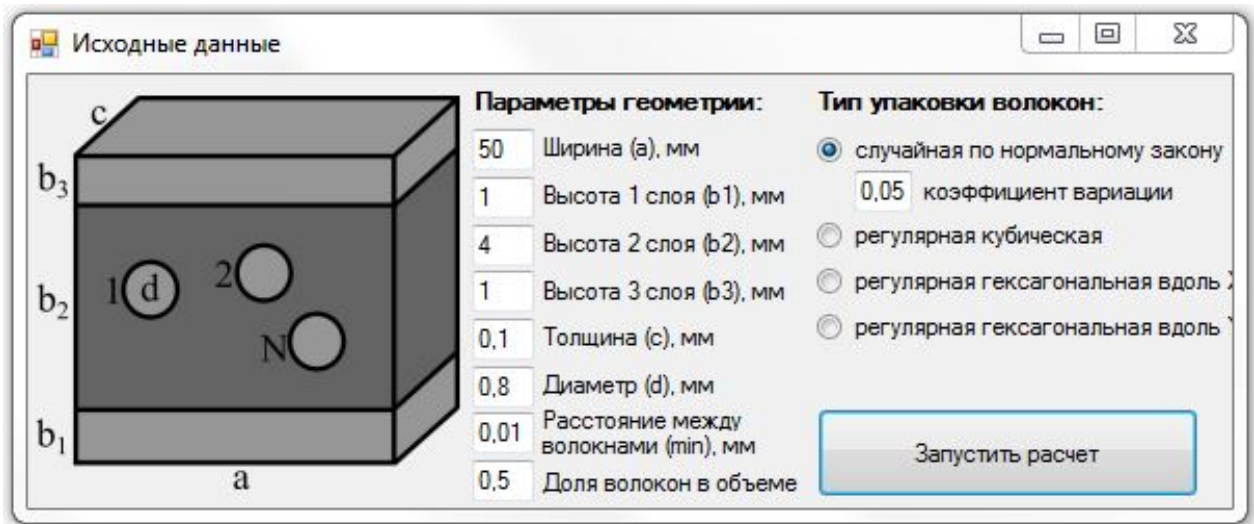


Рисунок 5 – Окно программы для моделирования геометрии микромодел

Как было сказано выше, данная программа позволяет получить текстовый файл командами на языке APDL, который можно загрузить в пакет ANSYS Mechanical APDL. В результате работы программы получается структура микромодел (Рисунок 6). В соответствии с данными, заложенными в программу, габариты модели такие же, как на скриншоте окна программы (Рисунок 5).

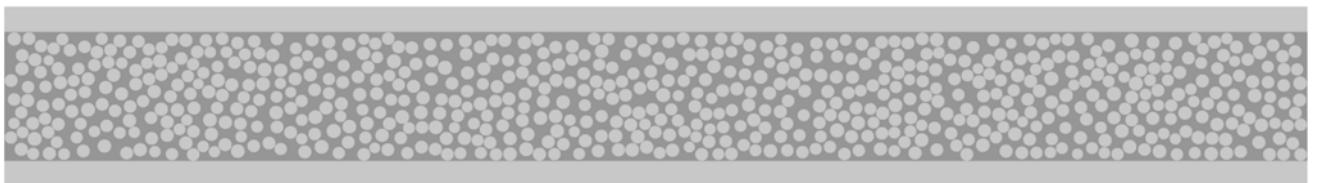


Рисунок 6 – Геометрическая структура микромодел ОВКМ со свойствами, закладываемыми на этапе проектирования

Для качественного сравнения, ниже показана реальная микроструктура ОВКМ (Рисунок 7).

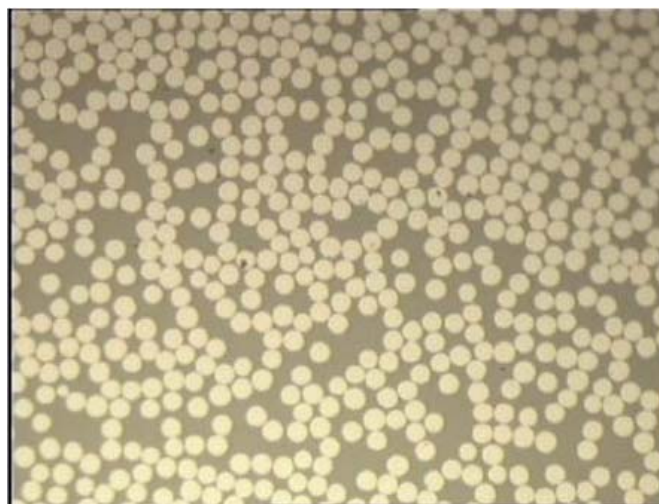


Рисунок 7 – Структура ОВКМ (стеклопластик)

Как видно, программа воспроизводит геометрию ОВКМ с достаточной степенью реализма.

2.2.2.2 Мезомоделирование

Создание геометрии мезомодели отличается от микромоделирования относительной простотой выполнения. Если для микромоделирования необходимо было применять специальную программу, чтобы упростить процесс построения геометрии, то геометрию мезомодели можно без особых усилий создать средствами пакетов программ 3D моделирования, таких как ANSYS DesignModeller или SolidWorks.

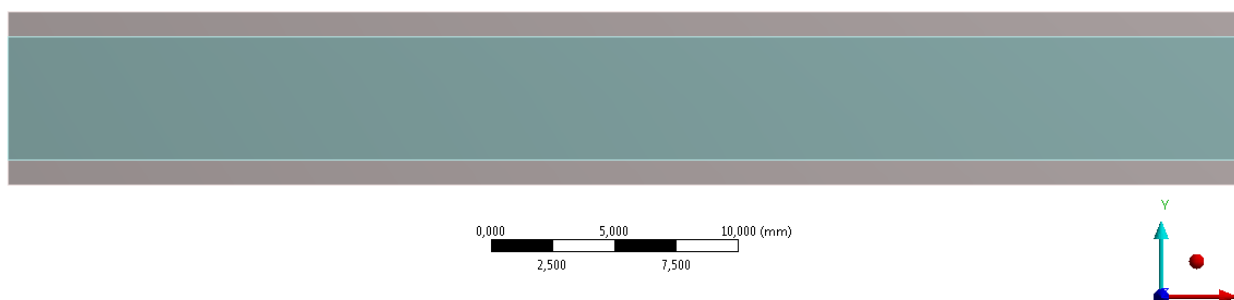


Рисунок 8 – Геометрическая структура мезомодели ОВКМ со свойствами, закладываемыми на этапе расчетов (серый - высокомодульный однонаправленный композит; голубой - высокомодульный однонаправленный композит, расположенный под углом 90° относительно оси x)

В программном пакете 3D моделирования создавался образец материала ОВКМ, геометрические размеры которого совпадали с образцом микромодели ОВКМ. Основным отличием являлось лишь то, что волокна в 90° слое не моделировались геометрически, однако, это не означает то, что их присутствие в материале не будет учтено в дальнейших расчетах. Механические свойства материала данного слоя планируется задать эквивалентными 90° слою микромодели (матрица + волокна) на этапе расчетов моделей. Построенная мезомодель представлена на Рисунок 8.

2.2.2.3 Макромоделирование

Для расчетов макромодели ОВКМ геометрии как таковой не требуется. Модель пакета представляет собой слоистую пластину, состоящую из идеально склеенных монослоев, каждый из которых – это набор параллельно соединенных одинаковых субэлементов (ячеек, Рисунок 9), обладающих различными прочностными свойствами и разрушающихся независимо друг от друга вдоль волокон, поперек и при сдвиге [18].

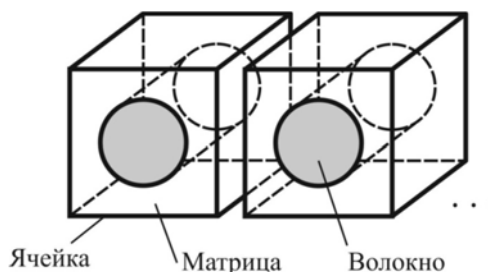


Рисунок 9 – Ячейки макромодели

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

2.3 Назначение внутренних параметров компонентов моделей ОВКМ

2.3.1 Назначение внутренних параметров компонентов микромодели и мезомодели ОВКМ

Назначение параметров моделей следует начинать с расчета микромодели ОВКМ в пакете ANSYS Mechanical, так как на основании данного расчета будут назначены параметры мезомодели ОВКМ. В данном разделе приведено краткое описание того, какие параметры будут назначаться для дальнейших расчетов моделей ОВКМ.

Полученную ранее в п. 2.2.2.1 геометрическую модель можно открыть в пакете ANSYS Workbench. Свойства материалов (таблица 2.1) были взяты из библиотеки пакета. Верхний и нижний 0° слои – это высокомодульный однонаправленный композит (Epoxy E-Glass UD). Материал матрицы – эпоксидная смола (Resin Epoxy), материал волокон – стекло (Glass) (Рисунок 10).

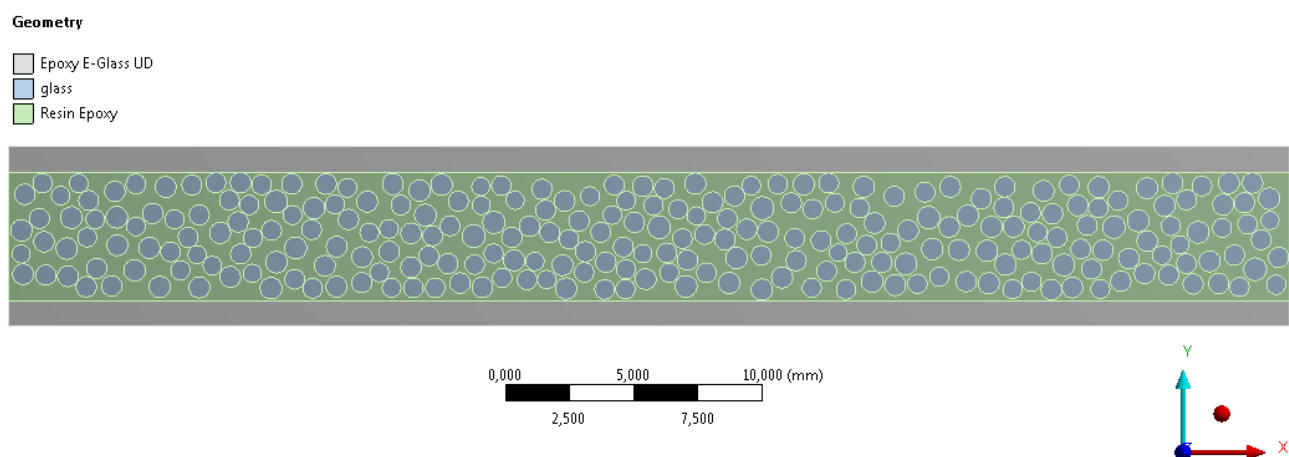


Рисунок 10 – Микромодель ОВКМ (серый - высокомодульный однонаправленный композит; зеленый - эпоксидная смола; голубой - стекло)

Таблица 2.1 - Характеристика материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	E, МПа	μ
Волокно	2500	73000	0,25
Матрица	1160	3780	0,35
Однонаправленный композит*	2000	40000	0,3

*свойства указаны в направлении оси x и плоскости ux

На Рисунок 11 представлен фрагмент КЭ модели микромоделли. Идеальный контакт между волокном и матрицей задан таким образом, что «отклеивание» волокна от матрицы не рассматривается как отдельный механизм разрушения элементов матрицы.

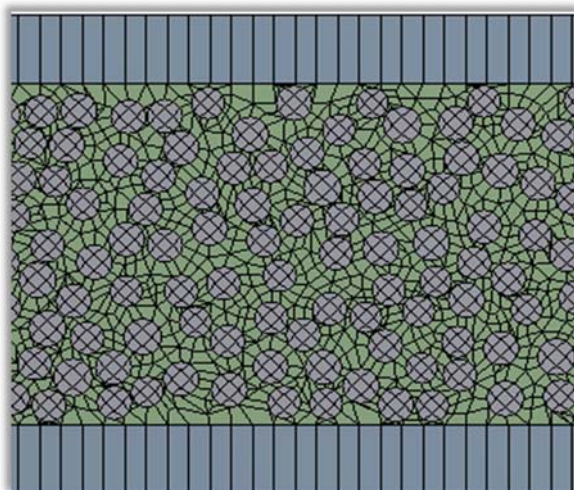


Рисунок 11 – Конечно-элементная модель микромоделли (голубой - высокомодульный однонаправленный композит; зеленый - эпоксидная смола; серый - стекло)

Аналогичным образом геометрическая мезомодель ОБКМ, описанная в п. 2.2.2.2 загружается в пакет ANSYS Workbench. Свойства 0° слоёв идентичны свойствам 0° слоёв микромоделли, свойства же 90° срединного слоя будут заданы на основе расчета, проведенного в пакете ANSYS с микромоделью ОБКМ.

На Рисунок 12 изображен фрагмент КЭ модели мезомодели ОВКМ. Размеры элементов в 90° слое подобраны таким образом, что количество элементов по толщине 90° слоя совпадает с количеством волокон по толщине в матрице микромодели.

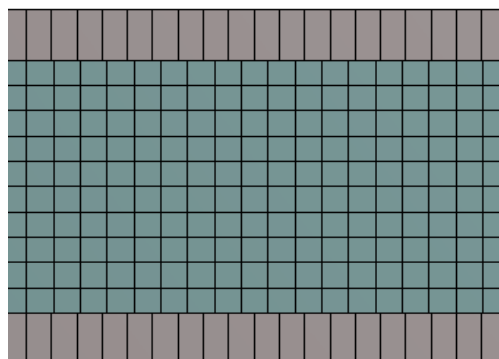


Рисунок 12 – Конечно-элементная модель мезомодели (серый - высокомодульный однонаправленный композит; зеленый - высокомодульный однонаправленный композит, расположенный под углом 90° относительно оси x)

Так же для корректного задания свойств материала необходимо было вычислить коэффициент Пуассона. Для этого была построена модель элементарной ячейки материала мезомодели, показанная на Рисунок 13, с регулярной кубической упаковкой и объемной долей волокна равной 50%. В направлении x прикладывалась растягивающая нагрузка.

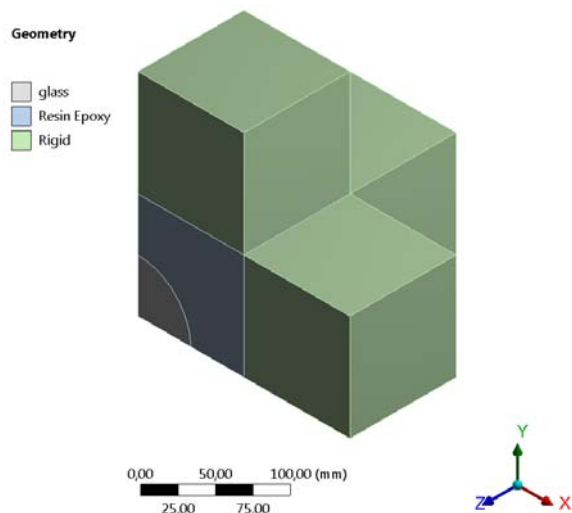


Рисунок 13 – модель ячейки материала с регулярной кубической упаковкой для вычисления коэффициента Пуассона (зеленый - абсолютно твёрдое тело; серый - стекло; синий - эпоксидная смола)

На Рисунок 14 представлены деформации ячейки материала вдоль осей x (слева) и y (справа), полученные для вычисления коэффициента Пуассона в результате расчета в пакете ANSYS.

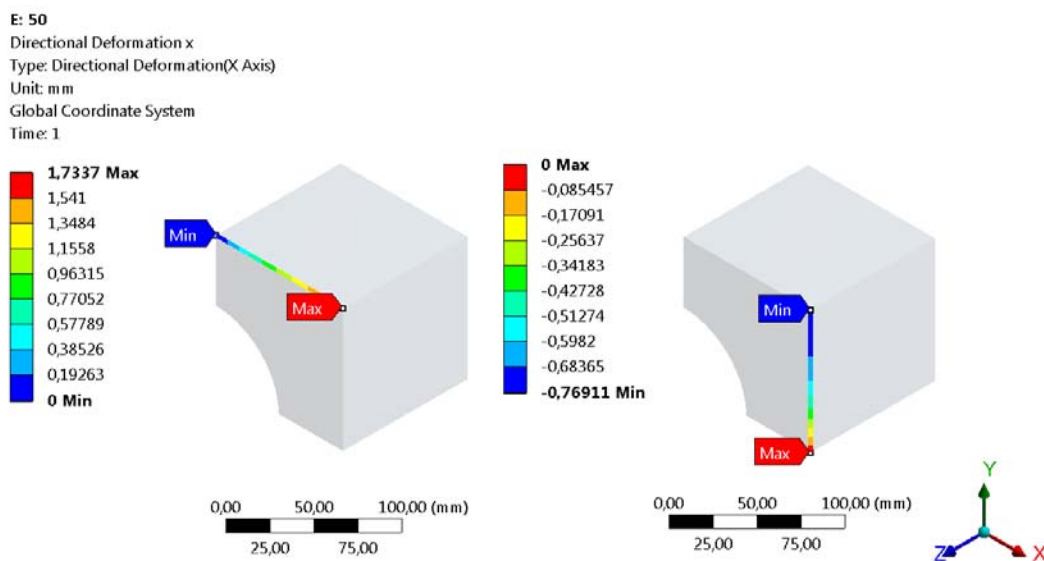


Рисунок 14 – деформации модели ячейки материала с регулярной кубической упаковкой для вычисления коэффициента Пуассона

Полученные деформации были использованы для вычисления коэффициента Пуассона ν_{xy} :

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{-0,76911\text{мм}}{1,7337\text{мм}} = 0,44 \quad (2.1)$$

Вычисленный коэффициент Пуассона ν_{xy} будет использован в расчете мезомодели.

2.3.2 Назначение внутренних параметров компонентов макромоделей в программном пакете FarGr

Задание параметров макромоделей не представляет сложности и не требует подготовки, кроме знания свойств материала.

Повреждения ячеек в модели считаются независимыми. Это допущение, помимо того, что упрощает анализ, связано с реализацией различных механизмов разрушения: при растяжении-сжатии – разрушение волокон или матрицы, а при сдвиге – отслоение волокон от матрицы. Учитывается, что ячейки могут разрушаться вдоль осей x и y как при растяжении, так при сжатии. Полагаем, что разброс характеристик прочности ячеек по любому из механизмов описывается нормальным законом распределения с известными средними значениями пределов текучести M и среднеквадратическими отклонениями s . Более того, при коэффициентах вариации $k_v < 0,30$, имеющих место в действительности, нормальный закон и закон Вейбулла практически совпадают.

Модель монослоя однозначно описывается набором упругих констант ($E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{xy}$) и прочностных характеристик ($M_{xt}, S_{xt}, M_{xc}, S_{xc}, M_{yt}, S_{yt}, M_{yc}, S_{yc}, M_s, s_s$) – на растяжение, сжатие и сдвиг в главных осях x и y . Всего 14 констант (или 9, если принять $k_i = 0,20$). Будем использовать сокращенное количество констант, равное девяти.

Рассмотрим вопросы определения средних значений M_i , которые должны наилучшим образом описывать накопление повреждений в монослоях.

Для примера приведем экспериментальную диаграмму растяжения углепластика КМУ-4Э при кинематическом нагружении вдоль направления укладки волокон (

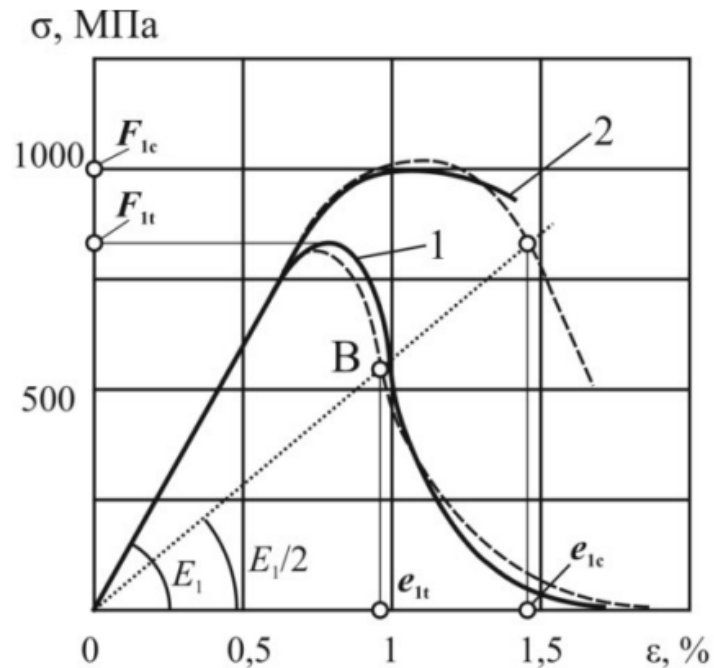


Рисунок 15).

Рисунок 15 – экспериментальная диаграмма растяжения углепластика КМУ-4Э

Модуль упругости $E_l = 145$ ГПа, предел прочности $F_{lt} = 800$ МПа, деформация в точке В на спадающей ветви с секущим модулем, равным половине начального равна $\epsilon_{lt} \approx 1,0\%$. Эта точка является характерной, так как известно M и при любых коэффициентах вариации ($k = s/M$) диаграммы деформирования пучка несвязанных волокон (или набора независимых ячеек) будут проходить через эту точку [45]. Отметим, что, если в монослое разрушено 50% ячеек ($W = 0,5$), то его секущий модуль в два раза меньше начального. Это соответствует тому, что $(eE/2) = M$, то есть математическое ожидание напряжений разрушения ячеек равно удвоенной ординате точки на диаграмме

нагружения с $W = 0,5$. Отсюда следует, что $M = 0,009 \cdot 1,45 \cdot 10^5 \text{ МПа} = 1335 \text{ МПа}$.

Для $k=0,2$ и $M = 1335 \text{ МПа}$ расчетная кривая напряжение – деформация приведена на рис.14 прерывистой линией. Соответствие расчета и эксперимента вполне удовлетворительное [18].

					<i>ЮрГУ – 15.04.03.2017.011 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		37

2.4 Моделирование нагружения ОБКМ в пакете ANSYS

Workbench

Было выполнено моделирование кинематического жесткого нагружения микромоделей ОБКМ в ANSYS Workbench. Структуру геометрической микромоделей, а также все свойства материалов было решено оставить без изменений. Для волокон и матрицы были использованы элементы SOLID164. Расчетная модель должна быть создана таким образом, чтобы волокна и матрица, заданные объемными элементами, имели общие узлы, а значит, определялись автоматически склеенными друг с другом. Для этих целей требовалось построить корректную расчетную сетку конечно-элементной модели.

2.4.1 Моделирование нагружения микромоделей

Создание сетки микромоделей сопровождалось рядом трудностей, поскольку необходимо было добиться удовлетворительного для расчета вида расчетной сетки. А именно: отсутствия вытянутых элементов и элементов-тетраэдров. Сложность составлял тот факт, что волокна в модели местами были расположены слишком близко друг к другу, что затрудняло построение сетки. Конечный результат представлен на Рисунок 11 в п. 2.3.1. Как можно заметить, элементы, на которые разбит материал матрицы и волокон, имеют примерно одинаковый размер, что положительно скажется на результатах расчета, так как элементы с одинаковыми сторонами в результате дают меньше ошибок.

На Рисунок 16 представлены граничные условия для полной расчетной микромоделей ОБКМ. Литерами А, В, С и D обозначены граничные условия, перемещения, заданные для данной модели.

B: 7 w/o mass scaling of 05micro rez07 Explicit Dynamics 1 5 1_d08_k005 04 12 cores
 Explicit Dynamics
 Time: 2,0306e-003 s

- A Displacement
- B Displacement 2
- C Displacement 3
- D Displacement 4

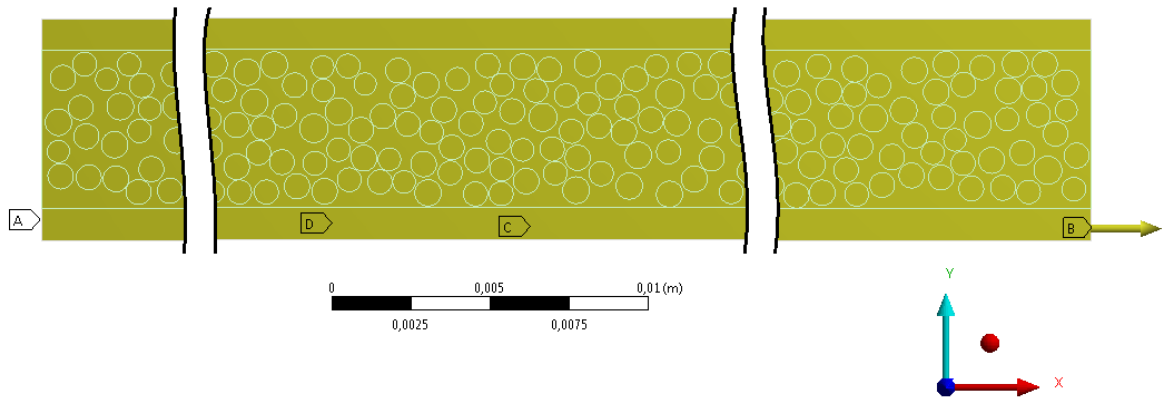


Рисунок 16 – Граничные условия для полной расчетной микромоделю ОВКМ

A – ограничение перемещения по оси x;

B – перемещение по оси x;

C, D – ограничение перемещения по оси z.

График перемещения B (программа нагружения образца микромоделю ОВКМ) по оси x выглядит следующим образом (Рисунок 17), где δ – перемещение, t – время.

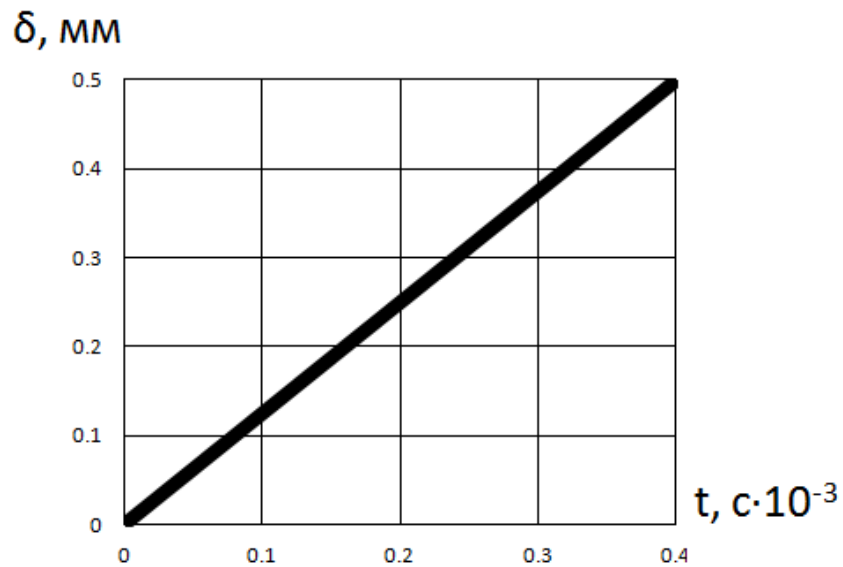


Рисунок 17 – Программа нагружения образца микромоделю ОВКМ

Время расчёта определялось следующим образом. Сперва необходимо было определить скорость звука в материале:

$$a = \sqrt{\frac{\bar{E}}{\bar{\rho}}} = \sqrt{\frac{10 \cdot 10^9 \text{ Па}}{2000 \text{ кг/м}^3}} = 2,5 \cdot 10^3 \text{ м/с}, \quad (2.2)$$

где \bar{E} – средний модуль Юнга в матрице;

$\bar{\rho}$ – средняя плотность материала.

Затем – найти время прохождения ударной волны от одного края образца до другого и обратно:

$$t = \frac{2 \cdot l}{a} = \frac{5 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{2,5 \cdot 10^3 \text{ м/с}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ с}, \quad (2.3)$$

где l – длина образца;

a – скорость звука в материале.

Время нагружения должно быть много больше (минимум на два порядка) времени прохождения ударной волны по образцу от одного края до другого и обратно. Поэтому примем время нагружения равным $4 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

2.4.2 Моделирование нагружения мезомодели

Расчётная мезомодель ОВКМ создавалась по аналогии с расчётной микромоделью ОВКМ. Конечно-элементная сетка мезомодели так же достаточно проста (рисунок 12). Все граничные условия для мезомодели ОВКМ, программа нагружения и конечные элементы, использованные в расчёте, совпадают с граничными условиями (рисунок 16), программой нагружения (рисунок 17) и конечными элементами для микромодели ОВКМ.

2.5 Результаты моделирования нагружения модели ОБКМ в пакете ANSYS Workbench

В результате моделирования были получены диаграммы деформирования модели многослойного стеклопластика с учетом накопления рассеянных микрповреждений. В результате нагружения в 90° слое появились трещины, матрица перестала нести нагрузку. По графику на Рисунок 18 можно увидеть, что после разрушения матрицы (момент времени $2e-4$ с) жёсткость модели стала заметно ниже, чем до разрушения.

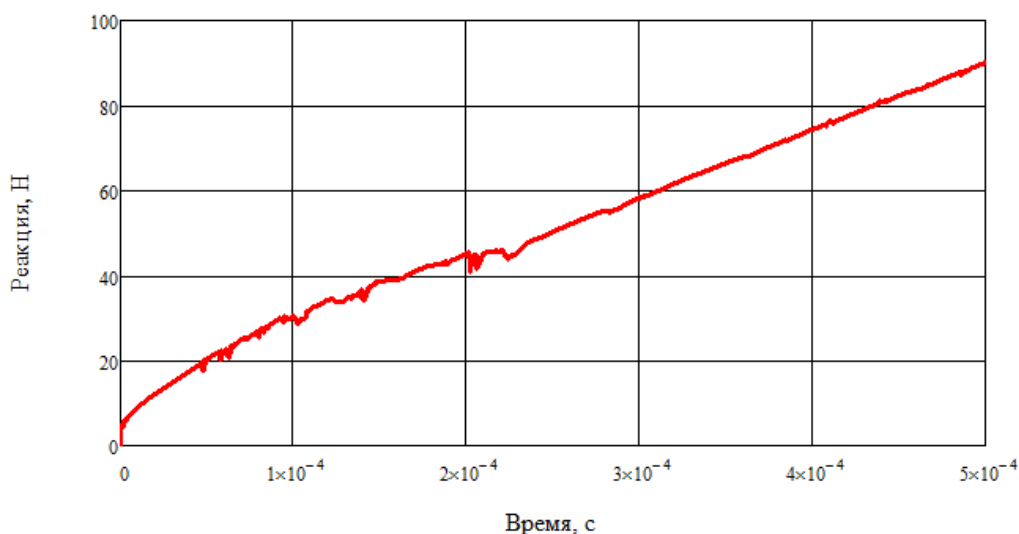


Рисунок 18 – Реакция нормальной силы в микромодели на перемещаемом торце

Максимальная нормальная сила в слое матрицы в микромодели – 10 Н (Рисунок 19). Было произведено 10 расчетов микромоделей с различной геометрией. Разница между моделями заключалась в том, что волокна в матрице были расположены случайным образом и не повторялись ни в одной модели.

На Рисунок 21 представлена зависимость реакции нормальной силы в образцах от времени. Стоит отметить, что различия между результатами лежат в сравнительно небольшом диапазоне. Самое большое значение реакции нормальной силы во 2-м образце, самое малое – в 3-м. Максимальное значение реакции во 2м образце составляет 90 Н, а максимальное значение реакции в 3м образце составляет 86 Н. Нетрудно посчитать, что реакция в 3м образце

составляет 96% от реакции во 2м образце, то есть разница между ними - менее 5%.

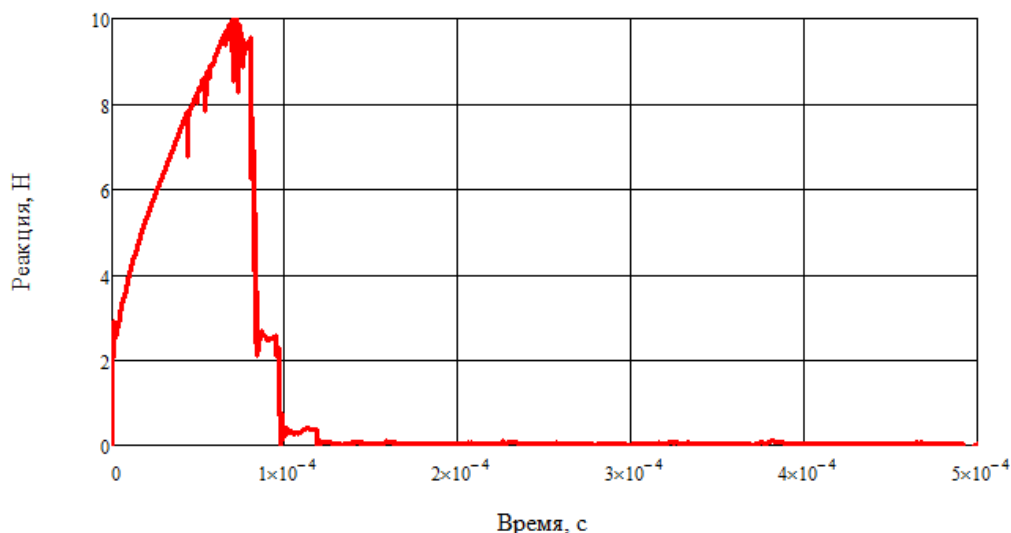
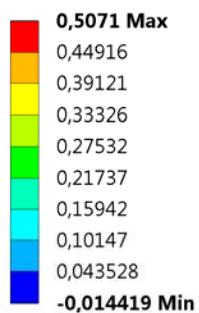


Рисунок 19 – Реакция нормальной силы в матрице микромоделю на перемещаемом торце

Так же интересным представляется сравнение структуры растрескивания матриц в образцах 2 и 3. Сравнение представлено на Рисунок 20. Можно сделать предположение, что образец под номером 3 выдержал меньшую нагрузку по причине разрушения матрицы вблизи места закрепления образца.

Образец 2 (сверху)

Directional Deformation 2
Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 5,e-004



Образец 3 (снизу)

Directional Deformation 2
Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 5,e-004

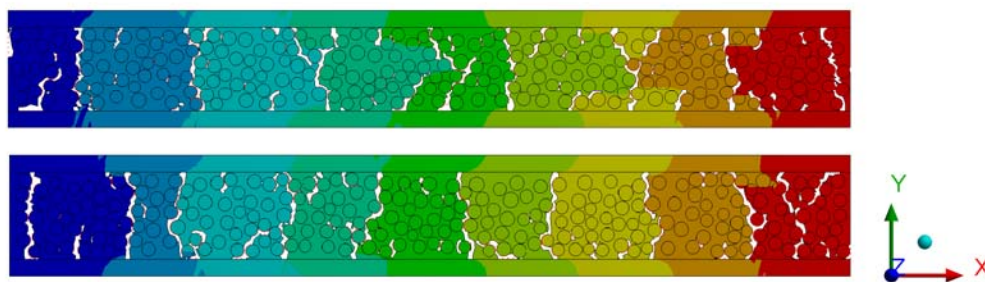
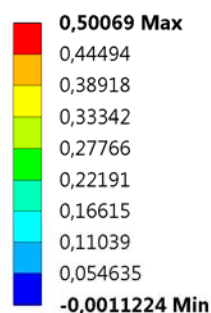


Рисунок 20 – сравнение картин разрушения образцов с наибольшей и наименьшей реакцией нормальной силы в перемещаемых торцах (образцы 2 и 3)

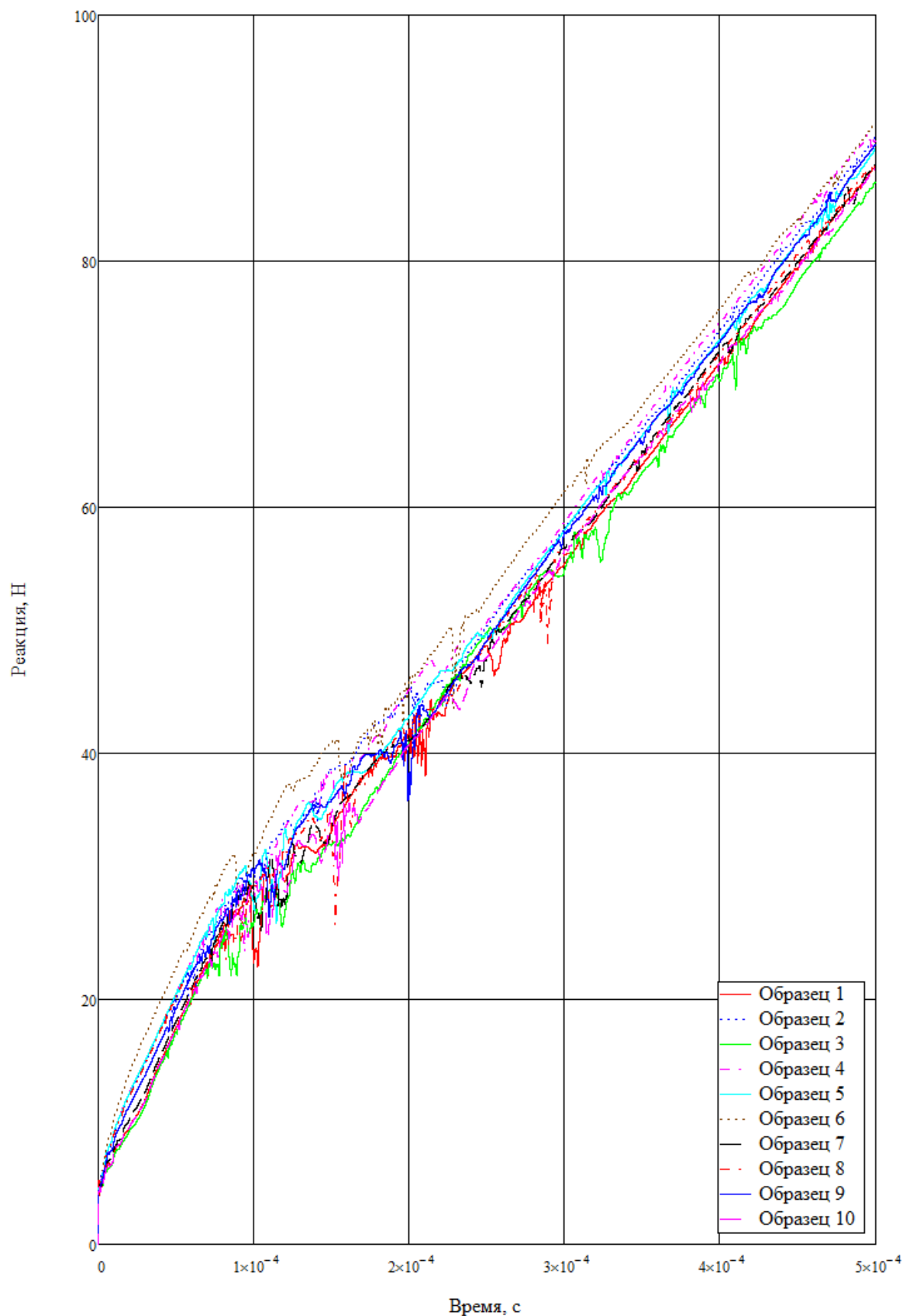


Рисунок 21 – Зависимость реакции нормальной силы в микромоделях образцов
ОВКМ от времени

Для того, чтобы производить расчет мезомодели, необходимо, чтобы она была по своим свойствам сопоставима с микромоделью. Плотность 90° слоя мезомодели подбиралась таким образом, чтобы его масса была равна массе 90° слоя микромоделли (таблица 2.2). Предел прочности матрицы мезо- и макромоделей вычисляется на основании расчета микромоделли.

В первом приближении предел прочности 90° слоя в направлении осей y и z для мезомодели (Рисунок 22) найдем, разделив предел прочности матрицы микромоделли на коэффициент концентрации для малой объемной доли волокон (Рисунок 23).

Coordinate System 90

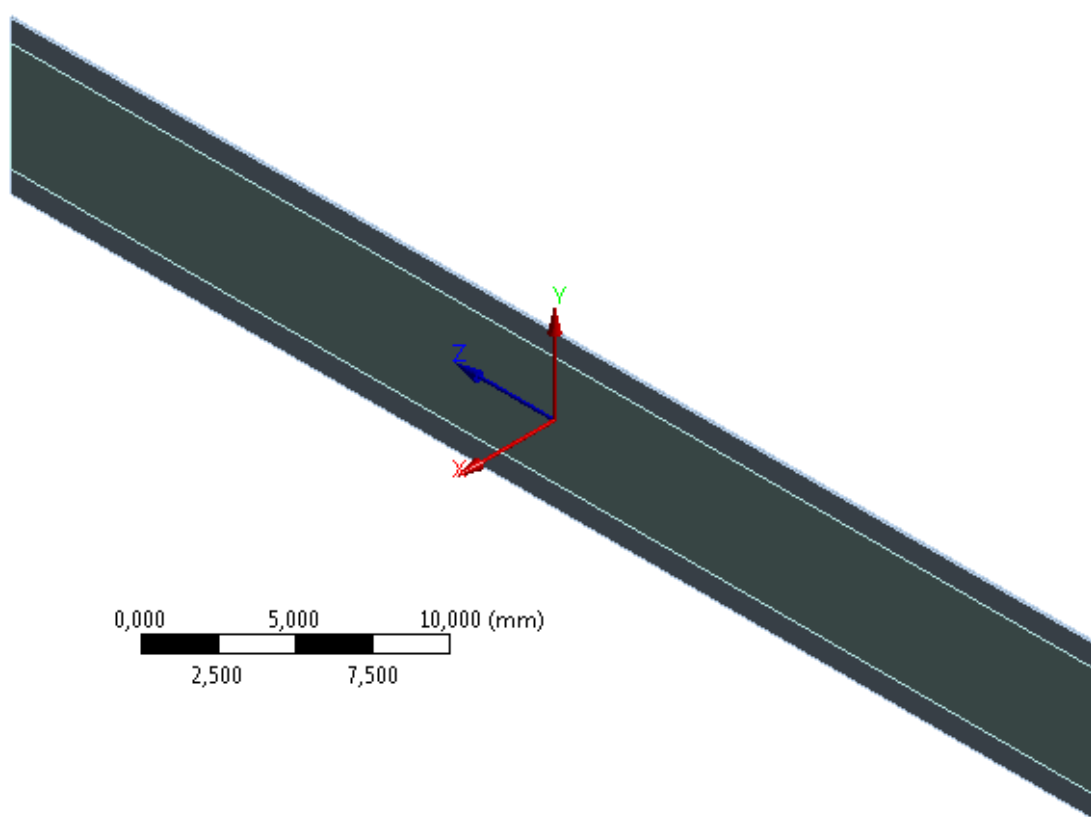
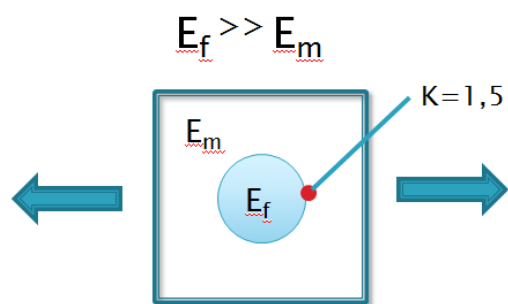


Рисунок 22 – Направления осей для матрицы мезомодели ОВКМ



$$\sigma_m = 50 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m^{mezo} = \frac{\sigma_m}{1,5} = 33,33 \text{ MPa} \quad (2.4)$$

Рисунок 23 – Расчет предела прочности матрицы мезомодели

При расчете мезомодели для верхнего и нижнего слоёв были заданы те же свойства, что и в микромоделю, а для 90° слоя был задан однонаправленный высокомодульный композит.

В срединном слое модели используется однонаправленный композит из библиотеки материалов ANSYS. Для этого материала задан случайный разброс прочностных свойств при помощи критерия Stochastic Failure (Рисунок 24).

	Stochastic Failure	
Distribution Type	Fixed Seed ▼	
Stochastic Variance γ		
Minimum Failure Fraction	0.1	

Рисунок 24 – Критерий Stochastic Failure в меню пакета ANSYS

Тут следует пояснить, что это за опция и зачем она задается. В реальных материалах, как известно, есть микродефекты (поры, разные диаметры волокон, различная плотность расположения волокон и т.д.). Там, где есть эти микродефекты, скорее возникнут трещины, а данный критерий позволяет смоделировать разброс прочностных свойств таким образом, как если бы в модели существовали эти дефекты.

Для данной модели выполнялось несколько расчетов и в каждом использовалось свое значение коэффициента стохастической вариации γ , моделирующее случайный разброс свойств в материале (пример для одного из расчетов показан на Рисунок 25).

Таблица 2.2 - Характеристика материала

Материал	Плотность, кг/м ³	E_x , МПа	M_{yz}
Однонаправленный КОМПОЗИТ+ВОЛОКНО	1829	40000	0,4

Для того чтобы результаты расчетов были сопоставимы друг с другом, коэффициент стохастической вариации γ подбирался так, что максимальная сила, действующая в 90° слое была примерно равна 10 Н (как в микромодели на Рисунок 19). Результаты расчета при 3-х разных значениях γ и сравнение с графиком для микромодели (нижний ряд справа) показаны на Рисунок 26.

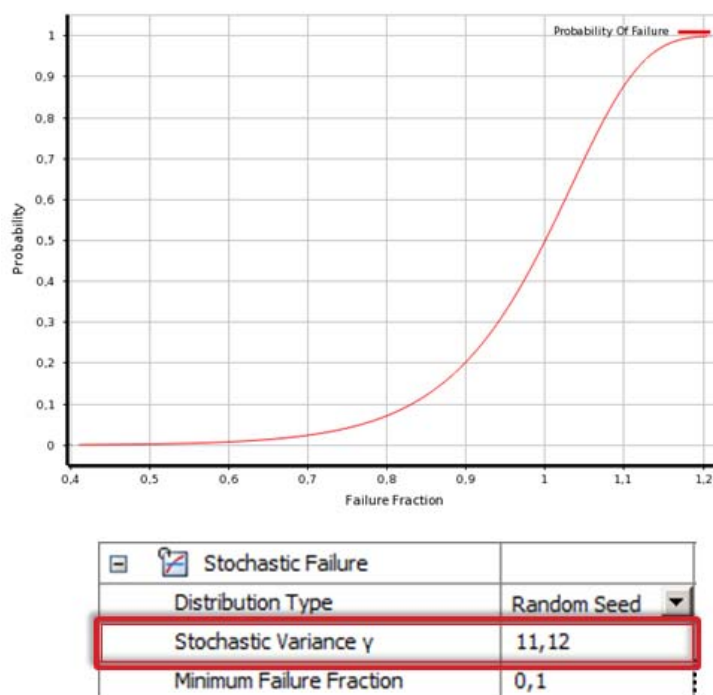


Рисунок 25 – Коэффициент вариации свойств материала

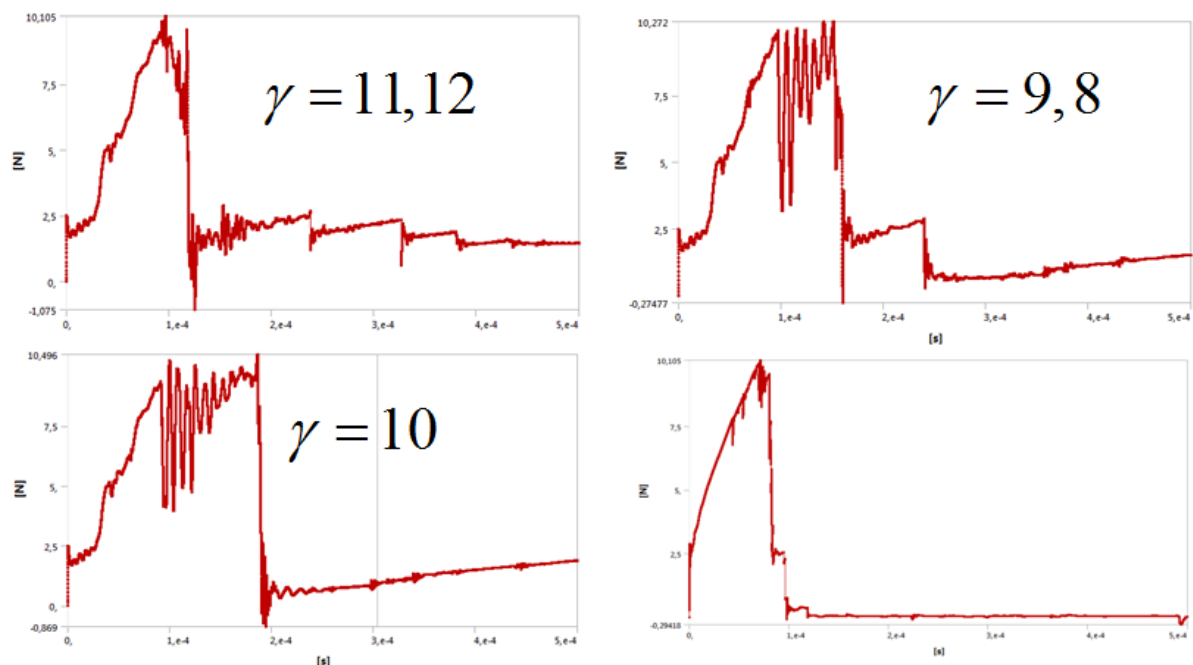


Рисунок 26 – Расчеты для трех мезо- и одной микромоделей

Максимальная сила в матрице микромоделей составила примерно 10 Н. По этим результатам вычисляем предел прочности для математической модели, который составил 20 МПа.

На Рисунок 27 представлены результаты расчета для мезомодели. Разрушение матрицы имеет тот же характер, что и у микромоделей.

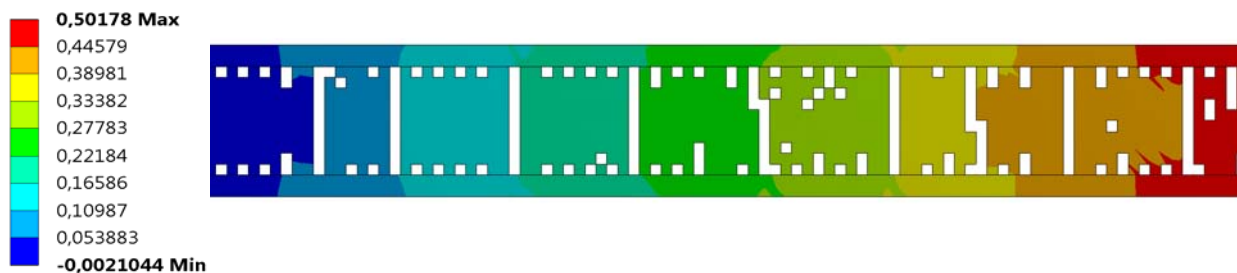


Рисунок 27 – Деформации в матрице мезомодели ОВКМ

Результат расчета для трех мезомоделей с различными коэффициентами стохастической вариации γ можно увидеть на Рисунок 28.

В макромоделей принят ряд допущений, которые позволяют значительно ускорить расчет. А именно: происходит хрупкое разрушение в результате накопления повреждений, напряжённое состояние – плоское, нет расслоений,

повреждения ячеек в 3-х направлениях независимы. Таким образом учитывается, что могут реализоваться различные механизмы разрушения.

Коэффициент вариации прочности $k=0,2$ (рекомендуется выбирать среднее значение из диапазона типичных для полимерных матриц коэффициентов $k=0,15...0,25$).

На этапах до и во время разрушения матрицы математическая модель близка к микромодели, а после разрушения матрицы – практически совпадает с расчетом для мезомодели. К сожалению, из-за высокого времени вычислений, для микромодели было произведено не так много расчётов.

Таким образом, из всего вышесказанного следует, что можно переходить к расчетам более объемных моделей конструктивных элементов.

					<i>ЮУрГУ – 15.04.03.2017.011 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		49

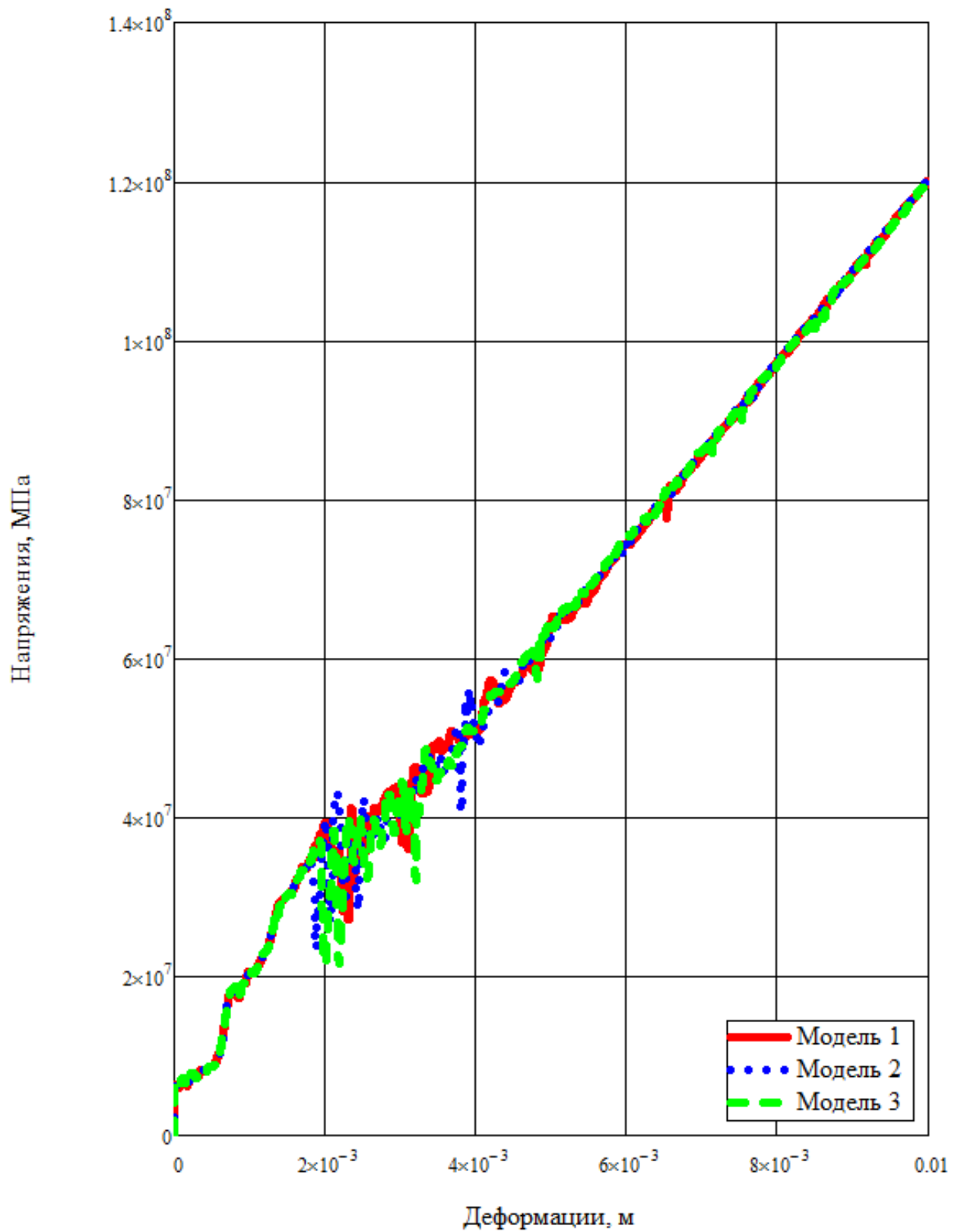


Рисунок 28 – Диаграмма напряжения-деформации для мезомodelей

На Рисунок 29 показано, что диаграммы деформирования качественно схожи.

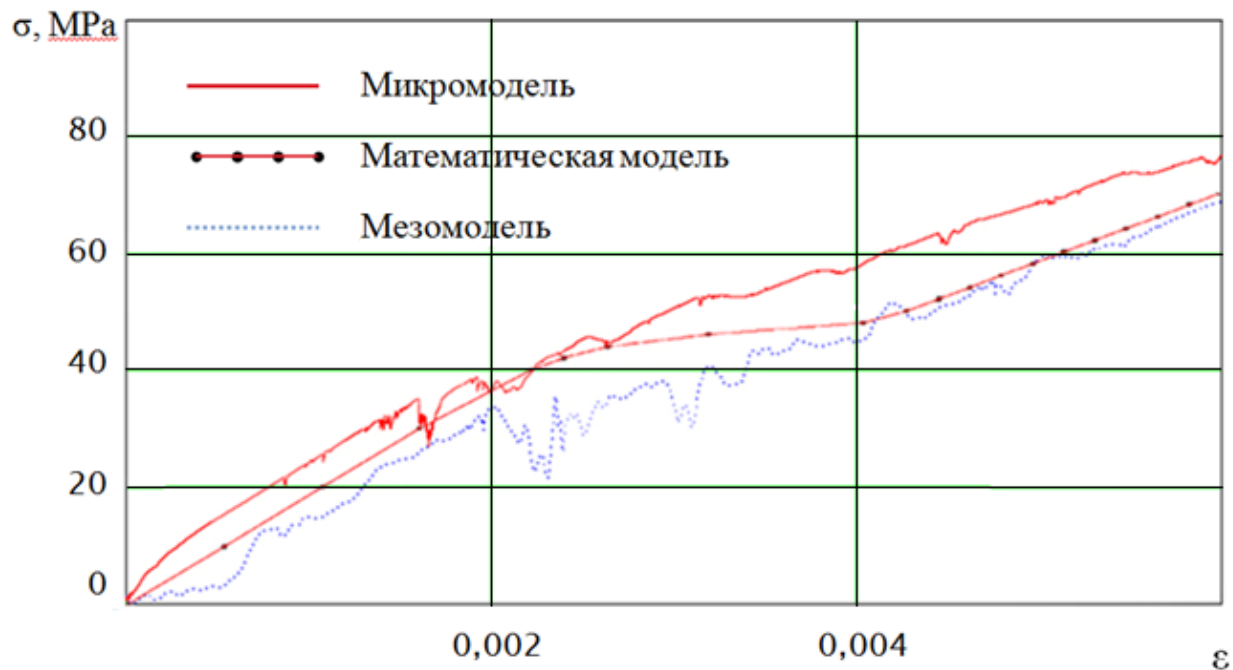


Рисунок 29 – Диаграммы деформирования моделей

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НА КОНСТРУКТИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ – ПЛАСТИНЕ С ОТВЕРСТИЕМ ИЗ ОБКМ

3.1 Создание геометрии модели пластины с отверстием из ОБКМ

Геометрию модели пластины с отверстием из ОБКМ можно было создавать в любом пакете 3D моделирования, например, ANSYS DesignModeller или SolidWorks. Она должна была быть по габаритам сравнима с использовавшимися ранее в расчётах микро- и мезомоделями. Отличительной особенностью модели конструктивного элемента являлась её толщина, так как это уже был не "срез" материала, а элемент конструкции, в котором можно было бы смоделировать отверстие (концентратор). Диаметр концентратора – 4 мм. Полученная модель представлена на рисунке 30.

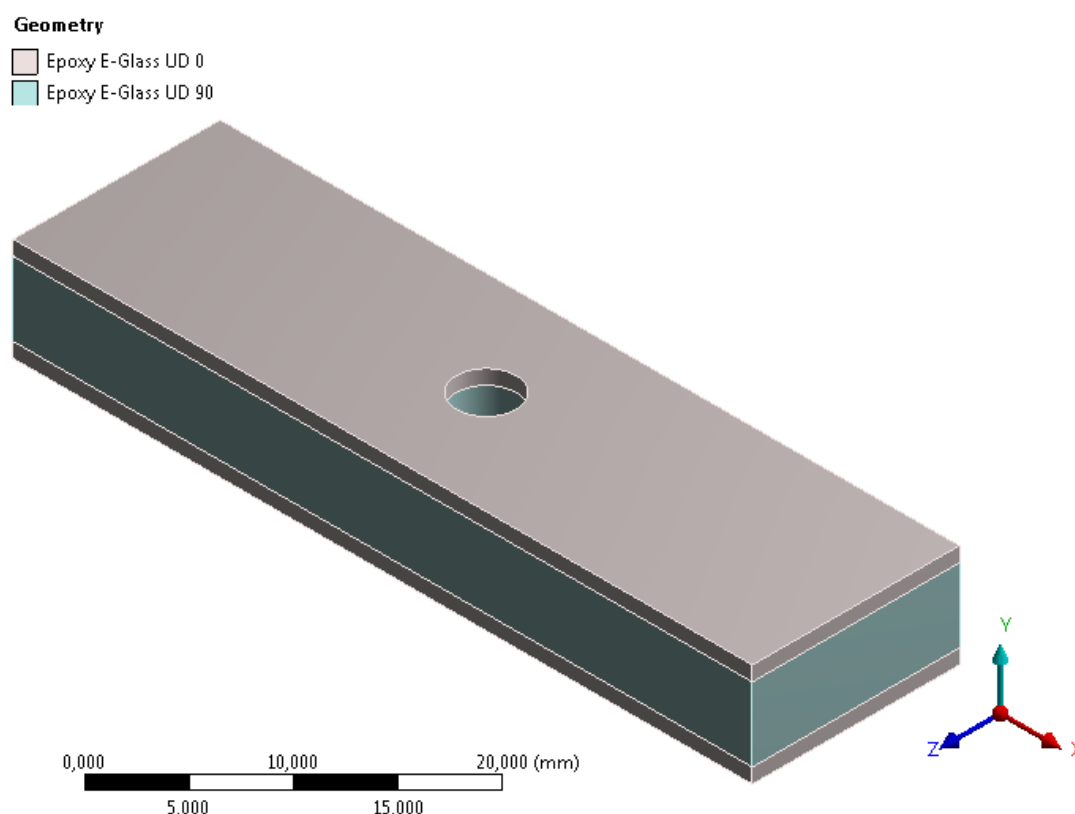


Рисунок 30 – Геометрия модели пластины с отверстием из ОБКМ (серый - высокомодульный однонаправленный композит; зеленый - высокомодульный однонаправленный композит с волокнами, расположенными под углом 90° относительно оси x)

3.2 Моделирование нагружения пластины с отверстием из ОВКМ в пакете ANSYS Workbench

Расчётная модель пластины с отверстием из ОВКМ аналогична расчётной модели микромоделю ОВКМ из п. 2.4. Показывать расчётную сетку модели целиком не имеет смысла, так как сетка практически регулярная, поэтому стоит продемонстрировать фрагмент сетки около концентратора напряжений (рисунок 31).

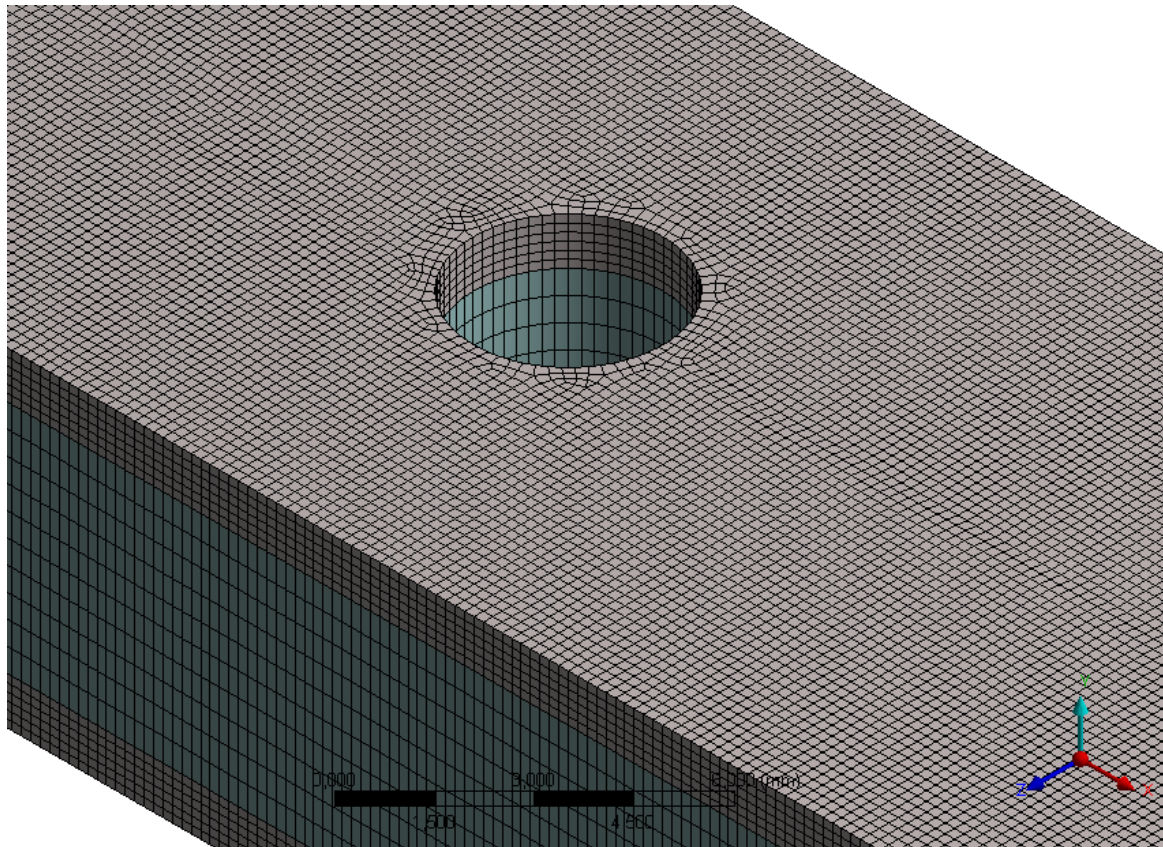


Рисунок 31 – Сетка на модели пластины с отверстием из ОВКМ (серый - высокомодульный однонаправленный композит; зеленый - высокомодульный однонаправленный композит с волокнами, расположенными под углом 90° относительно оси x)

Все граничные условия для пластины с отверстием из ОВКМ и программа нагружения совпадают с граничными условиями (рисунок 13) и программой

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

нагружения (рисунок 14) для микромоделей ОБКМ. Напомним, что модель закреплена на одном торце, а к другому приложено перемещение δ (рисунок 32). Конечные элементы, на которые была разбита модель, использованы те же, что и в предыдущем разделе – элементы SOLID164.

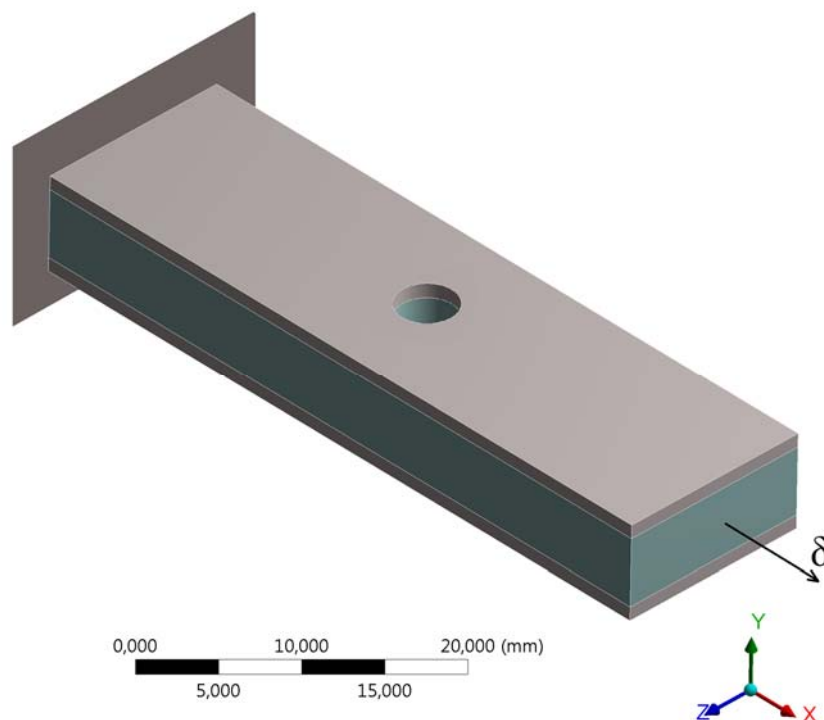


Рисунок 32 – Граничные условия модели (серый - высокомодульный однонаправленный композит; зеленый - высокомодульный однонаправленный композит с волокнами, расположенными под углом 90° относительно оси x)

3.3 Результаты моделирования нагружения пластины с отверстием из ОБКМ в пакете ANSYS Workbench

В результате моделирования был получен следующий механизм разрушения (рисунок 33).

E Copy of Copy of Copy of Copy of mezo for graph n/f w/o mass scaling of 05micro rez01 Explicit Dynamics 1 5 1_d05_k005
Normal Stress
Type: Normal Stress(X Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 6,8e-004
Cycle Number: 60814

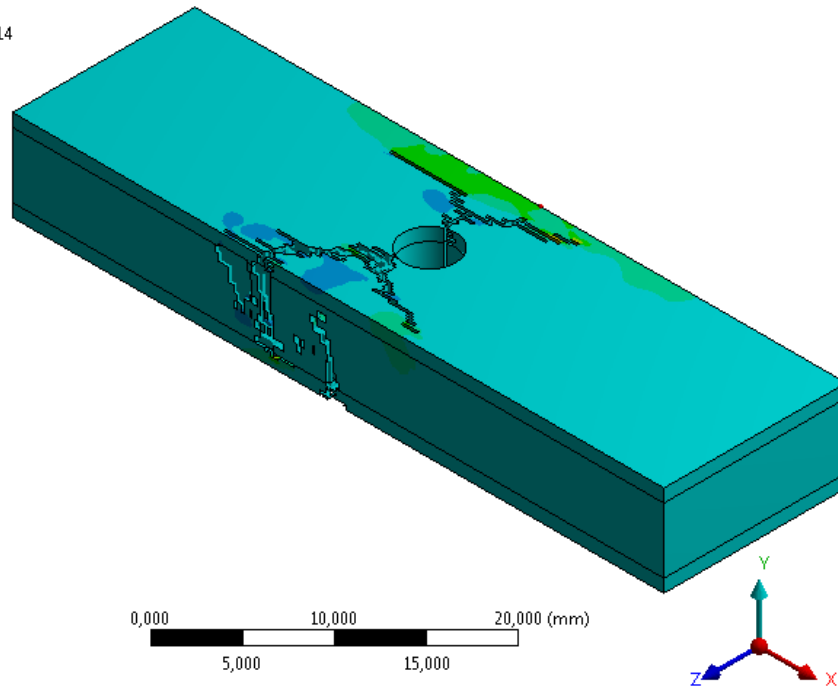
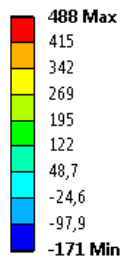


Рисунок 33 – Механизм разрушения модели пластины с отверстием

На рисунке 34 представлен график усилия в ортогональном слое модели пластины с отверстием из ОБКМ.

Поведение конструкции вполне хрупкое, что подтверждается экспериментальными данными, опубликованными в литературе. Здесь наиболее интересным является характер (механизм) разрушения, который связан с расслоением у кромки отверстия в точках, не лежащих в плоскости наименьшего сечения, а затем с прогрессирующим лавинообразным накоплением повреждений в трансверсальном слое.

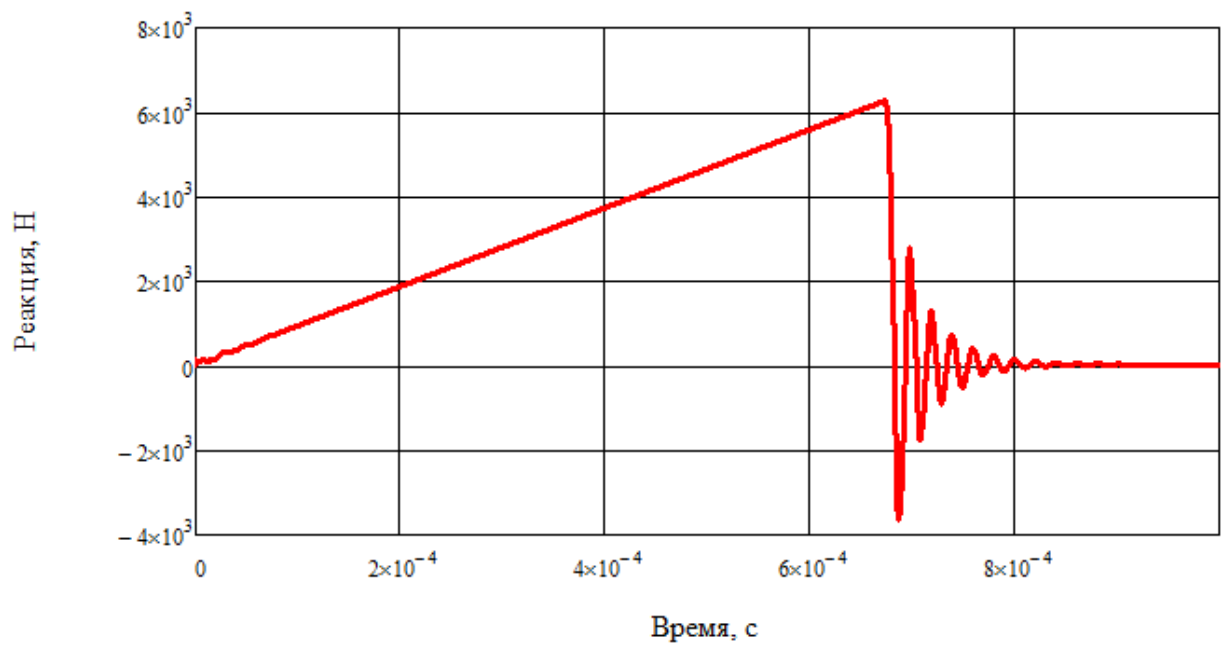


Рисунок 34 – Усилие в ортогональном слое модели пластины с отверстием из ОВКМ

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации были получены следующие результаты на основе микро- и мезомасштабного конечно-элементного моделирования слоистого стеклопластика, составленного из взаимно перпендикулярно ориентированных слоев:

- Исследовано напряженное состояние полимерной матрицы при трансверсальном квазистатическом нагружении стеклопластика со случайным расположением волокон (микромодель).

- При помощи метода конечных элементов (explicit formulation) рассмотрено накопление трансверсальных микроповреждений в структуре стеклопластика с объемной долей волокон около 50% в плоской постановке в составе перекрестно армированного композита типа $[0/90]$ со случайным расположением волокон в однонаправленных слоях. В качестве критерия прочности при удалении конечных элементов предложено рассматривать величину первого главного напряжения в полимерной матрице.

- Показано, что возникающие трещиноподобные крупные дефекты и рассеянные микроповреждения в структуре однонаправленного стеклопластика существенно снижают жесткость трансверсального слоя, что отражается на диаграмме деформирования композита в целом.

- Предложена оригинальная схема замещения микромодели эквивалентной по жесткости стохастической мезомоделью, в которой элементы объема имеют различную прочность в соответствии с известным распределением Мотта и разрушаются, снижая секущий модуль композита.

- Впервые на примере растяжения слоистой (стохастическая мезомодель) пластины с отверстием рассмотрено накопление случайных повреждений и разрушение с использованием МКЭ в явной постановке. Нагрузка и картина разрушения качественно соответствуют экспериментально наблюдаемым значениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sandhu R.S. A Survey of Failure Theories of Isotropic and Anisotropic Materials AFFDL-TR-72-71, Air Force Flight Dynamics Laboratory," Wright Patterson Air Force Base, OH. (1972, Avail. NTIS, AD-756889.)
2. Soden PD, Hinton MJ, Kaddour AS. A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates. *CompSci Tech* 1998;58(7):1225–54
3. Trias D. Analysis and simulation of random fracture of long fibre reinforced composites. PhD Thesis, University of Girona, Department of Engineering Mechanics and Industrial Construction, 2005.
4. И.В. Грушецкий, И.П. Димитриенко, А.Ф. Ермоленко и др. Разрушение конструкций из композитных материалов / Под ред. В.П. Тамужа и В.Д. Протасова. – Рига: Зинатне, 1986. – 264 с.
5. Н.А. Алфутов, П.А. Зиновьев, Б.Г. Попов. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
6. А.М. Скудра. Прочность косоугольно армированных пластиков при двухосном растяжении // *Механика армированных пластиков.* – Рига.: Рижский политех. ин-т, 1985. – С.17–27.
7. Б.У. Розен, Н.Ф. Дау. Механика разрушения волокнистых композитов // *Разрушение* / Ред. Г.Либовиц. – Т.7: Разрушение неметаллов и композитных материалов: Ч.1: Неорганические материалы / Под ред. Ю.Н. Работнова / Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – С. 300–306.
8. Petit P.H., Waddoups M.E. A Method of Predicting the Non-Linear Behavior of Laminated Composites // *J. Compos. Mater.* – 1969. – V.3. – January. – P. 2–19.
9. И.Ф. Образцов, В.В. Васильев, В.А. Бунаков. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 144 с.

10. Е.М. Ву. Прочность и разрушение композитов // Композиционные материалы / Ред. Л. Браутман и Р.Крок.– Т.5: Разрушение и усталость / Под ред. Л.Браутмана / Пер. с англ.–М.: Мир, 1970.–С. 206–266.
11. П.А. Лагас. Нелинейный характер зависимости «напряжение – деформация» для слоистых графитоэпоксидных пластиков //Аэрокосмическая техника / Пер.сангл.– М.: Мир.–№4, апрель 1986, с. 102–116.
12. Chou, S.-C., Orringer, O., Rainey, J.H. Post-Failure Behavior of Laminates: II — Stress Concentration (1977) *Journal of Composite Materials*, 11 (1), pp. 71-78.
13. Sandhu R.S. Nonlinear Response of Unidirectional and Angle Ply Laminates //AIAA Paper 74–380, 1974.–P.20–31.
14. Quaresimin, M., Carraro, P.A. Damage initiation and evolution in glass/epoxy tubes subjected to combined tension-torsion fatigue loading (2014) *International Journal of Fatigue*, 63, pp. 25-35.
15. Hosoi, A., Arao, Y., Kawada, H. Transverse crack growth behavior considering free-edge effect in quasi-isotropic CFRP laminates under high-cycle fatigue loading (2009) *Composites Science and Technology*, 69 (9), pp. 1388-1393.
16. Goidescu, C., Weleman, H., Garnier, C., Fazzini, M., Brault, R., Péronnet, E., Mistou, S. Damage investigation in CFRP composites using full-field measurement techniques: Combination of digital image stereo-correlation, infrared thermography and X-ray tomography (2013) *Composites Part B: Engineering*, 48, pp. 95-105.
17. Crouch, R.D., Clay, S.B., Oskay, C. Experimental and computational investigation of progressive damage accumulation in CFRP composites (2013) *Composites Part B: Engineering*, 48, pp. 59-67.
18. Сапожников С.Б. Дефекты и прочность армированных пластиков: Монография/Под ред. О.Ф. Чернявского. – Челябинск: ЧГПТУ, 1994. – 162 с.
19. HaNa Yu, Marco L. Longana, Meisam Jalalvand, Michael R. Wisnom, Kevin D. Potter Pseudo-ductility in intermingled carbon/glass hybrid composites with highly aligned discontinuous fibres. *Composites: Part A* 73 (2015) 35–44.

20. Промышленные полимерные композиционные материалы. Пер. с англ./Под ред. П.Г. Бабаевского. М.: Химия, 1980 – 472 с., ил. – Лондон: Эплайд Сайенс Паблишер, 1977.
21. Журнал «Строительные материалы».- М.: ЗАО “ЕвроХим-1”, 2002 г.
22. http://www.ruspol.spb.ru/reich_ds_pdf/440-m850.pdf.
23. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов: справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленинград. отделение, 1980 – 247 с.
24. Liu, W.-L., Chang, X.-L., Zhang, X.-J., Zhang, L. Analysis of composite transverse mechanical properties based on micromechanical finite element method. Cailiao Gongcheng/Journal of Materials Engineering Volume 44, Issue 11, 20 November 2016, Pages 107-113.
25. Liu P.F., Li X.K., Pang J.C. Finite Element Analysis of Micromechanical Progressive Failure Properties of Glass Fiber/Phenolic Resin Composites by Monte Carlo Simulation. Journal of Failure Analysis and Prevention Volume 16, Issue 6, 1 December 2016, Pages 1108-1120.
26. John A. Nairn. Matrix Microcracking in Composites // University of Utah, Salt Lake City, Utah, USA, 2000.
27. Herráez, M., Mora, D., Naya, F., Lopes, C.S., González, C., Llorca, J. Transverse cracking of cross-ply laminates: A computational micromechanics perspective // Composites Science and Technology, Volume 110, April 06, 2015, Pages 196-204.
28. Mora, D., González, C., Lopes, C.S., Naya, F., Llorca, J. Analisis of transverse cracking in unidirectional composite plies by means of computational micromechanics. (2014) 16th European Conference on Composite Materials, ECCM 2014.
29. Herráez, M., González, C., Lopes, C.S., de Villoria, R.G., Llorca, J., Varela, T., Sánchez, J. Computational micromechanics evaluation of the effect of fibre shape on the transverse strength of unidirectional composites: An approach to virtual

materials design (2016) *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Part 2 91, pp. 484-492.

- 30.D. Trias, J. Costa, B. Fiedler, T. Hobbiebrunken, J. Hurtado. A two-scale method for matrix cracking probability in fibre-reinforced composites based on a statistical representative volume element // *Composites Science and Technology*, 66, 11-12, 1766-1777, 2006.
- 31.Christensen RM. *Mechanics of composite materials* // Malabar, Florida: Krieger; 1979.
- 32.Sanchez-Hubert J, Sanchez-Palencia E. *Introduction aux methodes asymptotiques et a ` l'homogenisation* // Paris: Masson; 1992.
- 33.Byström J. Influence of inclusions distribution on the effective properties of heterogeneous media // *Compos Part B – Eng*, 34(7):587–92, 2003.
- 34.Buryachenko VA, Pagano NJ, Kim RY, Spowart JE. Quantitative description and numerical simulation of random microstructures of composites and their effective elastic moduli // *Int J Solid Struct*,40(1):47–72, 2003.
- 35.Brockenborough JR, Suresh S,Wienecke HA. Deformation of metal-matrix composites with continuous fibres: geometrical effects of fibre distribution and shape // *Acta Metal Mater*, 39(5):735–52, 1991.
- 36.Matsuda T, Ohno N, Tanaka H, Shimizu T. Effects of fibre distribution on elastic–viscoplastic behavior of long fibre-reinforced laminates // *Int J Mech Sci*, 45(10):1583–98, 2003.
- 37.Borbe'ly A, Biermann H, Hartmann O. FE investigation of the effect of particle distribution on the uniaxial stress–strain behaviour of particulate reinforced metal–matrix composites // *Mater Sci Eng A*, 313(1):34–45, 2001.
- 38.Fragmentation of Shell Cases N. F. Mott Published 1 May 1947. DOI: 10.1098/rspa.1947.0042.
- 39.ANSYS® Academic Research, Release 18, Help System, Explicit Dynamics Analysis Guide , ANSYS, Inc.
- 40.Berryman JG. Random close packing of hard spheres and disks. *PhysRev A* 1983;27(2):1053–61.

41. Clarke AS, Wiley JD. Numerical simulation of the dense random packing of a binary mixture of hard spheres: Amorphous metals. PhysRev B 1987;35(14):350–7357.
42. He D, Ekere NN, Cai L. Computer simulation of random packing of unequal particles. Phys Rev E 1999;60(6):7098–104.
43. Sanei S.H.R., Barsotti E.J., Leonhardt D., Fertig R.S. Characterization, synthetic generation, and statistical equivalence of composite microstructures Journal of Composite Materials Volume 51, Issue 13, 1 June 2017, Pages 1817-1829.
44. Wang, W., Dai, Y., Zhang, C., Gao, X., Zhao, M. Micromechanical Modeling of Fiber-Reinforced Composites with Statistically Equivlent Random Fiber Distribution. Materials Volume 9, Issue 8, 27 July 2016, Article number 624.
45. Я. Немец, С.В. Серенсен, В.С. Стреляев. Прочность пластмасс. М.: Машиностроение, 1970.– 335 с., с. 149.