

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет инженерно-физический  
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы  
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика  
Направленность (профиль) образовательной программы – Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зам.зав. кафедрой

  
\_\_\_\_\_ В.В. Соловьев  
« 13 » \_\_\_\_\_ 2023 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Разработка технологии получения композиционного материала на основе углеродных волокон с высокими физико-механическими характеристиками

Исполнитель  
студентка группы 917-об

  
\_\_\_\_\_ (подпись, дата)

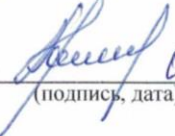
В.П. Березовская

Руководитель  
доцент, канд.техн.наук.

  
\_\_\_\_\_ (подпись, дата) 09.06.2023


В.В. Соловьев

Консультант по БЖД  
доцент, канд. техн. наук

  
\_\_\_\_\_ (подпись, дата) 09.06.2023

А.В. Козырь

Нормоконтроль

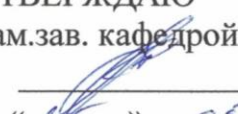
  
\_\_\_\_\_ (подпись, дата) 09.06.2023

М.А. Аревков

Благовещенск 2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет инженерно–физический  
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ  
Зам.зав. кафедрой  
 В.В. Соловьев  
« 25 » 05 2023 г.

### ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студентки Березовской Валерии Павловны

1. Тема выпускной квалификационной работы: Разработка технологии получения композиционного материала на основе углеродных волокон с высокими физико-механическими характеристиками

(утверждена приказом от 10.04.2023 №825–уч)

2. Срок сдачи студентом законченного проекта: 15 июня 2023

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: отчеты по практикам, ГОСТы, справочная литература

4. Содержание выпускной квалификационной работы: композиционные материалы, методы и объекты исследования, результаты исследования, безопасность жизнедеятельности, экономическая часть.

5. Перечень материалов приложения: титульный лист, цели и задачи, образцы для испытаний на сжатие, состав и результаты испытаний образцов на сжатие, технология получения композитных материалов методом ручного формования, технология получения композитных материалов методом вакуумного формования, технология получения композитных материалов методом вакуумной инфузии, результаты испытаний на растяжение .заключение.

6. Консультант по БЖД: Козырь А.В., доцент, канд. тех. наук.

7. Дата выдачи задания: 25.05.2023г

Руководитель выпускного квалификационного проекта: доцент, канд. тех. наук. Соловьев В.В.

Задание принял к исполнению (дата): 25.05.2023 Берез

## РЕФЕРАТ

Настоящая бакалаврская работа содержит 68 страниц, 35 рисунков, 19 таблиц, 14 источников.

КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ, УГЛЕПЛАСТИК, ЭПОКСИДНАЯ СМОЛА, ВАКУУМНОЕ ФОРМОВАНИЕ, ВАКУУМНАЯ ИНФУЗИЯ, РУЧНОЕ ФОРМОВАНИЕ, ПРОЧНОСТЬ, ТЕХНОЛОГИЯ

В работе представлены результаты исследований композитных материалов на основе углеродных волокон, включая их физико-механические характеристики и процессы изготовления.

Цель работы – разработка технологии получения композитных материала на основе углеродных волокон.

Задачи:

- Анализ информации о компонентах композитов, выбор материалов и способов формообразования будущего изделия;
- Создание опытных образцов;
- Проведение испытаний;
- Определение физико-механических характеристик.

В основной части описаны технологии производства композитов и их результаты испытаний. В разделе безопасности жизнедеятельности рассмотрены требования при работе с вредными веществами и мероприятия при компоновке рабочей зоны. В экономической части были рассчитаны затраты на материалы и заработную плату исследователю.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	8
1.1 Особенности композитов .....	8
1.2 Преимущества композитов .....	9
1.3 Армирующие наполнители .....	9
1.3.2 Волокнистые наполнители.....	10
1.3.3 Листовые наполнители.....	13
1.3.4 Объемные наполнители.....	13
1.4 Матрицы.....	14
1.4.1 Металлические матрицы .....	14
1.4.2 Полимерные матрицы.....	15
1.4.3 Керамические матрицы .....	19
1.5 Технология получения изделий из композитного материала .....	19
1.5.1 Контактное формование.....	20
1.5.2 Напыление .....	20
1.5.3 Вакуумное формование изделий.....	20
1.5.4 Формование прессованием .....	21
1.5.5 Автоклавное формование.....	21
2 МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	22
2.1 Объекты исследования .....	22
2.2 Приготовление образцов из эпоксидной смолы .....	23
2.3 Приготовление образцов из композитного материала.....	24
2.3.1 Образец №1 – Ручное формование с использованием эпоксидной смолы ЭД-20.....	24
2.3.2 Образец № 2 – Ручное формование с использованием эпоксидного компаунда Этал Карбон – 257У Light.....	26
2.3.3 Образец № 3 – Вакуумное формование с использованием смолы ЭД – 20.....	26

2.3.4 Образец № 4 – Вакуумное формование с использованием смолы Этал Карбон – 257У Light. ....	27
2.3.5 Образец № 5 – Вакуумная инфузия с использованием смолы Этал Карбон – 257У Light. ....	27
2.3.6 Образец № 6 – Вакуумное формование с использованием смолы ЭД – 16. ....	29
2.3.7 Образец № 7 – Вакуумная инфузия с использованием смолы ЭД – 20. ....	29
2.4 Изготовление цилиндрических форм для литья смолы.....	29
2.5 Методы исследования приготовленных образцов.....	31
2.5.1 Метод испытания на разрушающее напряжение при сжатии.....	31
2.5.2 Метод испытания на разрушающее напряжение при растяжении.....	32
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	35
3.1 Обоснование выбора рецептуры смесей .....	35
3.1.1 Описание результатов при работе со смолой ЭД – 20.....	35
3.1.2 Описание результатов при работе с эпоксидным компаундом Этал Карбон – 257У Light .....	37
3.1.3 Описание результатов при работе со смолой ЭД – 16.....	39
3.2 Результаты производства композитных материалов .....	41
3.2.1 Образец №1 .....	42
3.2.2 Образец №2.....	45
3.2.3 Образец №3.....	46
3.2.4 Образец №4.....	48
3.2.5 Образец №5.....	50
3.2.6 Образец №6.....	51
4 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	55
4.1 Вредные вещества .....	55
4.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов .....	55
4.3 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя .....	57
5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	60

5.1 Покупные комплектующие материалы .....	60
5.2 Транспортно-заготовительные расходы.....	61
5.3 Затраты на услуги по изготовлению.....	61
5.4 Основная заработная плата .....	61
5.5 Страховые взносы .....	62
5.6 Сравнение стоимости композитов при использовании различных видов смол.....	63
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	65
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	67

## ВВЕДЕНИЕ

Освоение новых материалов, особенно неметаллических, и технологии их производства, широкое их внедрение становится одним из важнейших направлений экономики материальных ресурсов и развития народного хозяйства.

Среди новых конструкционных материалов особое место принадлежит композиционным материалам и синтетическим смолам. Применение композитных материалов в авиации и космической отрасли привело к высокому уровню качества производства самолетов и ракетных систем, а также обусловило создание новых космических технологий.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) обладают специфическими особенностями, основная из них – высокая анизотропия свойств, позволяющая создавать конструкции с заранее заданными оптимальными характеристиками, и обеспечивают снижение массы конструкции на 25 – 40 %, повышают коэффициент использования материала в 2 раза, снижают трудоемкость изготовления деталей и агрегатов на 30-50%.

Исследования в этой области должны быть ориентированы на эффективное внедрение новой техники, и сократить до минимума время разработок.

Особенно широкое применение получили углеродные волокна (УВ) в качестве наполнителя в технологии композиционных материалов.

Углеродные волокна широко используются в композитных материалах в качестве наполнителя. Они занимают лидирующее положение по объему производства среди других жаростойких волокон. УВ по механическим характеристикам, включая их удельные показатели (отношение модуля Юнга и прочности к плотности), превосходят все другие жаростойкие волокна.

## 1 КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Композитный материал – это неоднородный сплошной материал, который состоит из двух и более компонентов, одним из которых является армирующий элемент, обеспечивающий необходимые механические характеристики материала, а другим – матрица, обеспечивающая совместную работу армирующих элементов.

### 1.1 Особенности композитов

Гомогенные материалы, включая традиционные металлические сплавы, имеют огромный потенциал для увеличения своей прочности в теории. Тем не менее, техническая прочность уже приблизилась к пределу, так как разрушение происходит из-за накопления микрповреждений в материале. Возможно избежать этого эффекта, используя материал в виде волокон. Чем тоньше волокно, тем меньше дефектов остается в его сечении. Эти волокна затем используются в матрице, чтобы обеспечить работу волокон на сжатие, сдвиг и растяжение в конструкционных приложениях.

Свойства разрушения волокнистых композиций при растяжении зависят от объемного содержания и соотношения деформаций волокон и матрицы до разрушения, а также от ориентации волокон, которая существенно влияет на их механические характеристики. В отличие от традиционных материалов, у композитов другой механизм усталостного разрушения при циклических нагрузках, что обеспечивает их повышенную устойчивость к усталости. Благодаря сниженной чувствительности к концентрации напряжений и низкой скорости распространения трещин в композитах, они также обладают высокой долговечностью конструкций.

У деталей, изготовленных из полимерных композитов, спектр собственных колебаний значительно шире, чем у деталей из металлов. Для алюминиевых, титановых сплавов и сталей спектры собственных частот колебаний близки к резонансным, и для отхода от резонансного режима требуется изменение геометрических размеров деталей. В высокомодульных



полимерных материалах достижение этой цели достигается в основном путем изменения ориентации волокон в отдельных слоях. Использование композитов, таких как углепластики, обладающих низким температурным коэффициентом линейного расширения, позволяет снизить термонапряженность конструкции. Композиты предоставляют возможность широкого варьирования практически всех свойств материала путем подбора составных компонентов, их количественного соотношения, распределения и ориентации в объеме материала. Это позволяет создавать конструкционные материалы многофункционального назначения со служебными свойствами, часто противоположными друг другу.

## **1.2 Преимущества композитов**

К основным преимуществам композитов относятся:

- Высокие значения удельной прочности и жесткости, которые превышают аналогичные характеристики металлов в 2-3 раза;
- Показатели сопротивления усталости уникальны, так как предел выносливости на разрыв близок к пределу прочности, а также материал устойчив к вибрационным и акустическим нагрузкам;
- Ликвидация избыточной конструктивной массы, которая неизбежна в тонкостенных металлических конструкциях;
- Пригоден для создания крупногабаритных комплексных конструкций со сложной аэродинамической формой;
- Повышают качество аэродинамической поверхности и жесткости оболочек;
- Свойства анизотропии могут быть управляемы в широких диапазонах.

## **1.3 Армирующие наполнители**

К основным видам наполнителей относятся:

### **1.3.1 Дисперсные наполнители**

Представляют собой порошкообразный компонент органического или неорганического происхождения

К таким наполнителям относят каолин, тальк, слюда (мусковит), мел, кварц (стекло), барит, аэросил, асбест, белую сажу, технический углерод, литопон, гидроксид алюминия, рутил, гипс, корунд и другие.

### 1.3.2 Волокнистые наполнители

Такие наполнители уступают место дисперсным наполнителям по популярности применения. Они изготавливаются в виде нитей, волокон, жгутов, ровингов.

В композитном материале волокна влияют на прочность и жесткость, так как они воспринимают основные напряжения, приходящиеся на материал в процессе нагружения, передавая ему прочность и жесткость в направлении ориентации волокон. Механические характеристики композита зависят от свойств волокон, их размера, формы, ориентации и содержания в композите.

Наиболее распространенными среди них являются стеклянные, углеродистые, борные и высокомодульные органические волокна.

- *Стеклянные волокна*

Непрерывные стеклянные волокна образуются из расплавленной стекломассы путем вытягивания струи на выходе из фильер до диаметра (5–200)10<sup>6</sup> метров и быстрого охлаждения. Модуль упругости волокон составляет 50–130 ГПа, плотность 2500–2600 кг/м<sup>3</sup>.

При производстве композитов стеклянные волокна используются в виде первичных нитей, ровингов или крученых нитей и тканей на их основе.

Достоинствами композитов из стеклянных волокон являются высокая прочность при растяжении и сжатии, сравнительно низкая стоимость исходных материалов и процесса изготовления, хорошая совместимость с полимерными матрицами и технологичность.

Недостатки связаны с низким модулем упругости и сравнительно низкой теплостойкостью.

Из композитов на основе стеклянных волокон изготавливают баллоны давления, цистерны и резервуары, малотоннажные суда, лодки, катера и яхты, элементы кузова автомобилей, винты самолетов и вертолетов, радиопрозрачные обтекатели и купола.

- *Углеродистые волокна*

Углеродистые волокна изготавливаются в процессе сначала температурного, а потом механического воздействия на исходные органические волокна, приводящем к их карбонизации, графитизации и совершенствованию структуры. Механические характеристики зависят от исходного сырья и равняются: предел прочности 2–3,5 ГПа, модуль упругости 220–700 ГПа.

Углеродные волокна обычно применяются в виде жгутов, лент и тканей. Они уступают стеклянным волокнам из-за своей хрупкости и химической инертности, в следствии которой имеются сложности в пропитке волокон растворами материалов матрицы.

Достоинствами углеродных волокон является их высокая жесткость. Механические характеристики не изменяются даже при повышении температуры до 450°C. Волокна имеют отрицательный температурный коэффициент линейного расширения.

Из композитов на основе углеродных волокон изготавливают несущие панели крыла, оперения и фюзеляжа самолета, элементы конструкций ферм, карданные валы автомобилей, детали, работающие в условиях интенсивного теплового воздействия.

- *Борные волокна*

Для получения борных волокон нагревают вольфрамовую нить диаметром (12–16)10<sup>-6</sup> метров и осаждают на нее бор. В результате образуется борная оболочка вокруг нити. Волокна характеризуются пределом прочности при растяжении 2–4 ГПа, модулем упругости 370–430 ГПа, плотностью 2500–2700 кг/м<sup>3</sup>.

Такие волокна характеризуются большой прочностью и жесткостью при сжатии и растяжении, а снижение характеристик начинается только при

повышении температуры выше 400°C. Недостатками являются высокая стоимость, хрупкость и низкую технологичность, большую толщину элементарного слоя.

Волокна выпускаются в виде моноволокон, комплексных нитей и лент.

Композиты на основе борных волокон применяются для изготовления стержневых элементов и панелей, а также для усиления профилей и элементов конструкций с целью повышения их жесткости и прочности при сжатии.

- *Высокомодульные органические волокна*

Высокомодульные органические волокна получают из концентрированных растворов полимеров формованием через фильеры. Для того, чтобы удалить основную часть растворителя, их пропускают через ванну осаждения, после чего происходит вытяжка и фиксация структуры волокон. Такие волокна имеют плотность 1410–1450 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при растяжении 1,8–3,0 ГПа, модуль упругости 70–130 ГПа.

Для органоволокнитов используют эластичные (лавсан, капрон, нитрон) и жесткие (ароматический полиамид, винол) синтетические волокна.

Особенностью таких волокон является то, что они могут сохранять исходные характеристики до температуры 180°C и при увеличении температуры карбонизируются.

Органические волокна по удельной прочности и жесткости превосходят стеклянные волокна, но при сжатии значительно уступают им. А также они значительно хуже совмещаются с полимерными связующими, чем стеклянные.

Характеристики волокон, применяющиеся в настоящее время в композитах, представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики волокон

Параметр	Стекло- ное	Углеродное		Борное	Органиче- ское	Стально- е
		высокомоду- льное	высокопроч- ное			
Плотность 10 <sup>-3</sup> , кг/м <sup>3</sup>	2,5	1,95	1,76	2,5	1,45	7,8
Модуль упругости, ГПа	89	400	260	400	120	210

Предел прочности при растяжении, ГПа	3,5	2,1	3,3	3,5	2,8	2,9
Удельная жесткость $10^{-6}$ , м	3,6	20,3	14,7	16	8,3	2,7
Удельная прочность $10^{-3}$ , м	140	108	187	140	193	37

### 1.3.3 Листовые наполнители

Листовые наполнители характеризуются тем, что они имеют заданную структуру различного плетения (сатиновое, саржевое, полотняное), лент, сеток, бумаги, холстов, чем отличаются от волокнистых, которым можно придать любую структуру с помощью плетения, склейки и других методов.

Отдельные листы наполнителя, пропитанные смолой, выкладываются друг на друга и спрессовываются в изделие. Такие материалы называются слоистыми пластиками. Чаще всего для них используют фенольно-формальдегидные смолы.

По виду наполнителя слоистые пластики подразделяются на: текстолиты – с хлопчатобумажными тканями; гетинаксы – с бумагой; древесно-слоистые пластики – с древесным шпоном; стеклотекстолиты – с тканями из стеклянного волокна.

### 1.3.4 Объемные наполнители

К ним относят объемные ткани, открытопористые каркасные системы, структура которых непрерывна в трех направлениях.

Отличительными особенностями таких наполнителей является объемная масса, общая, закрытая и открытая пористость и размер пор.

При заполнении пор каркасного наполнителя полимерным связующим формируется взаимопроникающая структура материала. Характеристики таких систем определяются свойствами исходных компонентов, их соотношением и степенью пропитки.

## 1.4 Матрицы

Матрица – это непрерывная фаза, которая обеспечивает монолитность материала, способствует сохранению формы изделия, обеспечивает распределение нагрузки на арматуру.

Выбор типа матрицы влияет на метод изготовления конструкции. Следовательно, матрица должна удовлетворять следующим требованиям:

- Обладать достаточной жесткостью, прочностью, теплостойкостью, трещиностойкостью для обеспечения работоспособности композита в процессе эксплуатации;
- Способствовать хорошему смачиванию волокна, иметь невысокие значения параметров окончательного формообразования, возможность предварительного изготовления препрегов, качественное соединение слоев композита для обеспечения высокого уровня технологичности.

Матрицы подразделяются на металлические, полимерные, керамические.

### 1.4.1 Металлические матрицы

Металлические матрицы чаще всего находят применение совместно с высокомодульными борными или углеродными волокнами. Такие композиты обладают более высокой жесткостью и прочностью при нагружении поперек волокон и сдвиге. Но проигрывают полимерным композитам в том, что для производства композитов с металлическими матрицами требуется больше технологических методов.

Для создания металлической матрицы чаще всего используют сплавы на основе алюминия. При использовании твердофазных способов изготовления композитов применяют деформированные алюминиевые сплавы. Они имеют малую плотность, высокие механические свойства, высокую пластичность. При использовании жидкофазных методов применяют литейные алюминиевые сплавы, в которых могут содержаться небольшие количества магния, кремния, марганца и меди. Такие сплавы отличаются повышенной текучестью, малой линейной усадкой, пониженной склонностью к образованию трещин при высоких температурах.

В качестве металлической матрицы могут использоваться магниевые сплавы, так как такая матрица практически не реагирует с материалами, которые используются для получения упрочняющих волокон.

Сплавы титана позволяют повысить прочность конструкции, что положительно сказывается на использовании сложных изделий в аэрокосмической отрасли. А для повышения жесткости композита можно совместно с титановой матрицей использовать высокомодульные волокна.

Использование меди в качестве материала матрицы ограничивается вследствие снижения прочностных свойств при повышении температуры. Но этот недостаток возможно устранить, армируя медь волокнами вольфрама, железа, графита.

#### 1.4.2 Полимерные матрицы

Полимеры в качестве матрицы бывают в двух видах: либо в чистом виде (порошки, гранулы, листы, пленки), либо в виде связующего, то есть в виде системы из полимера и отвердителя, с возможным добавлением растворителей, красителей, пластификаторов, стабилизаторов или иных компонентов.

Связующие делятся на термореактивные и термопластичные.

1. Термореактивные полимеры – это связующие, которые в исходном состоянии имеют вязкую структуру. Далее в процессе полимеризации структура становится твердой, нерастворимой и неплавкой. Эти полимеры редко применяются без добавок, таких как наполнители, красители, загустители, стабилизаторы, разбавители. Полученные сложные многокомпонентные материалы называются реактопластами, которые от типа связующего делятся на фенопласты, аминопласты, полиэфирные, эпоксидные, полиуретановые, кремнийорганические и другие.

- *Фенолоальдегидные смолы* – это продукты поликонденсации фенолов с альдегидами. Наибольшее распространение получили фенолоформальдегидные смолы.

В неотвержденном состоянии представляют собой хрупкую прозрачную аморфную массу, переходящую при 60–120°C в жидкое состояние.

Процесс отверждения происходит при температурах 160–200°C. Вследствие выделения большого количества летучих веществ, эти смолы отличаются повышенной хрупкостью и объемной усадкой в 15–20 %.

Фенол и формальдегид являются ядовитыми и огнеопасными веществами. Работа с канцерогенами оказывает угнетающее воздействие на нервную систему человека, а также может приводить к кожным заболеваниям.

- *Аминосмолы* – это продукты конденсации карбамида (меламин, анилин) с формальдегидом. Смола обладает низкой стойкостью к горячей воде, спирту, формалину и глицерину. Смолы на основе мочевины имеют прозрачный цвет и используются для изготовления изделий методом заливки.

- *Ненасыщенные полиэфирные смолы* – это гетероцепные терморезистивные олигомеры и полимеры, содержащие сложноэфирные группы и кратные углерод-углеродные связи. Существуют три типа: ортофталевая, изофталевая, терефталевая.

Такие смолы способны отверждаться при комнатной температуре и без выделения побочных продуктов. С ними возможно получить композиты различными методами: формовка, намотка нитей, ручное наслоение. Это обуславливается хорошим смачиванием волокон, простотой использования, высокой прочностью.

- *Полиуретановые полимеры* – это синтетические полимеры, получаемые из полиолов – многоатомных спиртов, содержащих в себе более одной гидроксигруппы. Полиуретаны превосходят все типы резины, каучуков, а также некоторые металлы. Это связано с тем, что их свойства варьируются от природы и длины участков цепи между уретановыми группировками. Такие полимеры имеют различную структуру: вязкие жидкости, твердые аморфные вещества, твердые кристаллические вещества.

Перечисленные особенности определяют физико-механические параметры. Полиуретанам присуща повышенная прочность, что позволяет работать с изделиями, испытывающими высокие механические нагрузки. К недостаткам относят то, что их свойства зависят от перепадов температур.



Кроме того, подвержены воздействию щелочей и способны накапливать остаточные деформации.

- *Эпоксидные смолы* – мономерные, олигомерные или полимерные растворимые соединения, в состав молекул которых входит не менее двух эпоксидных или глицидиловых групп.

Эпоксидно-диановые смолы – это смолы, полученные в результате реакции дифенилопропана с эпихлоргидрином. Подходят для использования в бытовых целях, для изготовления полов и столешниц, производства пластиков. Примером таких смол являются смолы ЭД – 8, ЭД – 16, ЭД – 20 и другие.

В отдельную группу выделяют эпоксидно-диановые смолы для изготовления лаков и красок. Их используют для производства лаков, эмалей, шпаклевок и других покрытий, подверженных действию агрессивных сред. Примером таких смол является смола Э – 40.

Эпоксидно-модифицированные смолы представляют модифицированную форму эпоксидно-диановой смолы, в которую добавили кремнийорганические соединения. Изделия на основе таких смол можно использовать при повышенных и криогенных температурах.

Эпоксидные смолы специального назначения используются для производства изделий, работающих в экстремальных условиях. К этой группе относятся смолы ЭХД (хлорсодержащая), УП – 637.

К основным преимуществам эпоксидных смол относят: высокую прочность, хорошую адгезию к металлам, водонепроницаемость, устойчивость к износу, минимальную усадку, отверждение в широком диапазоне температур.

- Кремнийорганические полимеры – термостойкие высокомолекулярные соединения, в составе которых содержатся молекулы кремния и углерода. Серьезными ограничениями на их использование являются низкие прочностные характеристики и сложность обработки изделий.

2. Термопластичные полимеры (термопласты) – это полимеры, которые размягчаются при нагревании и затвердевают при охлаждении. При обычной

температуре имеют твердое состояние, а при нагревании переходят в вязкотекучее состояние. Такие переходы могут повторяться многократно.

- *Полиэтилен* – при нормальной температуре устойчив к действию многих кислот, водонепроницаем, разлагается при температуре выше 300° С.

- *Полипропилен* – устойчив к действию многих кислот и щелочей, разложение происходит в отсутствие воздуха при температурах выше 300° С. Обладает высокой износостойкостью, сопротивлением изгибу.

- *Полистирол* – устойчив к некоторым кислотам, щелочей, трансформаторного масла. Разрушается при контакте с концентрированной азотной и уксусной кислотами и при температурах выше 266° С. Имеет хрупкую структуру и легко подвергается старению.

- *Политетрафторэтилен* – наиболее устойчивый полимер к действию высококонцентрированных и разбавленных кислот и щелочей, сильных окислителей. Разлагается при температурах выше 415° С.

- *Поливинилхлорид* – стойкий к химическим реагентам, не горит. Разлагается при температуре 170° С. Обладает малой морозостойкостью и нагревостойкостью.

- *Полиметиленоксид* – имеет высокое сопротивление усталостным нагрузкам среди всех термопластов. Полимеру свойственны низкая ползучесть, высокая износостойкость.

- *Полифениленоксид* – термопласт на основе фениленоксида, который стоек к агрессивным средам, грибковой плесени, отличается высокой технологичностью.

- *Полифениленсульфид* – по химической стойкости уступает политетрафторэтилену, разлагается при температуре 720° С. Имеет высокую термостойкость, устойчив к окислителям.

- *Полиэтилентерефталат* – известен как лавсан, устойчив к слабым кислотам, минеральным солям, эфирам, жирам. Изделия, изготовленные из лавсана, обладают стабильной формой, низкой гигроскопичностью и низким коэффициентом трения.

- *Поликарбонат* – полимер обладает низкой гигроскопичностью, стоек к действию микроорганизмов, устойчив к УФ-излучению. Изделия отличаются стабильностью размеров.
- *Полиарилаты* – устойчивы к УФ-излучению, стойкие к разбавленным минеральным и органическим кислотам, бензину, керосину. Разлагается при температуре 420° С.
- *Полиамиды* – устойчивы к органическим растворителям. Изделия из полиамидов отличаются прочностью, износостойкостью, низкой гигроскопичностью.
- *Полиимиды* – отличаются стабильностью физико-химических свойств в широком интервале температур, а именно от минус 200 до плюс 300° С. Для изделий из полиимидов характерны стабильность размеров, низкая ползучесть, высокая термостойкость.

3. Эластомеры – полимеры, способные увеличивать длину в несколько раз при растяжении. Такие свойства эластомеров, как низкое сопротивление старению и деструкция при одновременном действии тепла и кислорода, сильно ограничивают их применение как компонент композитных материалов.

#### 1.4.3 Керамические матрицы

Для композитных материалов с керамической матрицей характерны следующие свойства: высокая прочность на сжатие, высокая стойкость к окислению, высокая прочность на растяжение и ударная вязкость, стойкость к вибрациям и термоудару.

Благодаря таким свойствам керамические композиционные материалы применяются для ответственных деталей, которые работают в среде высоких температур, в качестве теплозащитных материалов в огнеупорной промышленности.

### 1.5 Технология получения изделий из композитного материала

Процесс получения композитных материалов состоит из следующих этапов:

1. Подготовка армирующего материала. Подготавливается оснастка, которая должна иметь форму будущего изделия. На ее поверхность наносится разделительная смазка или гелькоут, который защитит изделие от ультрафиолета и агрессивных сред.

2. Приготовление связующего. Для приготовления связующего необходимо смешать компоненты в необходимой пропорции.

3. Пропитка армирующего материала. В ходе операции связующее заполняет объем между волокнами при его нанесении на поверхность армирующего материала.

4. Отверждение.

5. Контроль качества изделия

Существует несколько способов пропитки армирующего материала:

#### 1.5.1 Контактное формование

Способ получения композитного материала, при котором слои будущего изделия прикатываются роликами друг к другу, повторяя форму оснастки. Форма может быть позитивной и негативной. При позитивной воспроизводится внутренний контур, а при негативной – наружный. При таком способе точные размеры и гладкость имеет только поверхность изделия, прилегающая к форме.

#### 1.5.2 Напыление

Волокнистая арматура рубится на короткие отрезки – штапельки – и доставляется в открытую форму одновременно со смесью соответствующей смолы и катализатора. Ровинг волокна проходит через рубильное устройство и вдувается в поток смолы, который направляется в форму распылительной системой.

#### 1.5.3 Вакуумное формование изделий

Основано на разности давлений внутри формы и за ее пределами. Этот метод обеспечивает высокое качество изделий, так как давление на материал равномерно распределяется во всех направлениях.

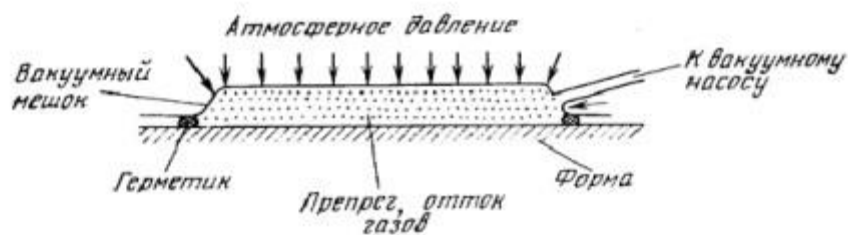


Рисунок 1 – Процесс вакуумного формования

Внешнее давление, действующее через эластичную диафрагму, выполняет несколько функций, таких как уплотнение слоев материала на форме, глубокая пропитка волокон связующим, выдавливание побочных продуктов реакции и воздушных пузырьков из пустот материала.

#### 1.5.4 Формование прессованием

Процесс, при котором материал принимает заданную конфигурацию в пресс-форме и отверждается там же. Этот метод используется в 50% случаев при изготовлении армированных пластмассовых изделий, когда требуются высокая производительность, точность и воспроизводимость деталей. При этом достигается высокое качество изделий при минимальной стоимости.

#### 1.5.5 Автоклавное формование

Технология автоклавного формования предусматривает передачу давления на материал, который должен быть отформован, с помощью жидкости или газа. Таким образом, можно обеспечить необходимую температуру для формования и последующего отверждения изделия.

Автоклавы – наиболее универсальное оборудование для производства композитных изделий. Они позволяют создавать большие избыточные давления рабочего тела (воздуха, инертных газов, азота) при температурах в диапазоне от 150 до 380 °С. Автоклавная технология формования применяется для изготовления изделий любой формы и размера.

## 2 МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Объекты исследования

Объектами исследования являются образцы из эпоксидной смолы с различным соотношением отвердителя и образцы полимерных углеродсодержащих композитов, полученных различным способом выкладки.

Образцы смолы разделены на три части: одна часть состоит из смолы ЭД – 20 и отвердителя ПЭПА в пропорциях от 5 до 30%; вторая часть из эпоксидного компаунда Этал Карбон – 257У Light и отвердителя в пропорциях от 10 до 35%; третья часть состоит из смолы ЭД – 16 и отвердителя ПЭПА в пропорциях от 5 до 25%. Объем смолы варьировался от 25 до 300 миллилитров.

Маркировка и состав образцов представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2– Маркировка образцов из эпоксидной смолы

Маркировка образца	Соотношение компонентов	
	Отвердитель, %	Смола, %
ЭД-20+ПЭПА		
2	10	90
3	15	85
1	5	95
4	20	80
5	25	75
Этал Карбон-257У Light+Этал-45		
8	20	80
9	25	75
10	30	70
7	15	85
6	10	90
11	35	65
ЭД-16+ПЭПА		
12	10	90
13	15	85
14	20	80
15	25	75

Таблица 3 – Маркировка образцов из композитных материалов

Маркировка образца	Компоненты	Метод формования
1	углеткань саржа 2/2 – 12К – 1000 – 400 смола ЭД-20 отвердитель ПЭПА	ручное формование

2	углеткань саржа 2/2 – 12К – 1000 – 400 эпоксидный компаунд Этал Карбон-257У Light	ручное формование
3	углеткань саржа 2/2 – 12К – 1000 – 400 смола ЭД-20 отвердитель ПЭПА	вакуумное формование
4	углеткань саржа 2/2 – 12К – 1000 – 400 эпоксидный компаунд Этал Карбон-257У Light	вакуумное формование
5	углеткань саржа 2/2 – 12К – 1000 – 400 эпоксидный компаунд Этал Карбон-257У Light	вакуумная инфузия
6	углеткань саржа 2/2 – 3К – 1000 – 200 смола ЭД-16 отвердитель ПЭПА	вакуумное формование

## 2.2 Приготовление образцов из эпоксидной смолы

Приборы: смола ЭД-16, смола ЭД-20, отвердитель ПЭПА, эпоксидный компаунд Этал Карбон-257У Light, лабораторные весы, цилиндрические пластиковые формы, восковая смазка Вс – М, деревянные палочки, пластиковые стаканы, перчатки, хомуты.

Последовательность выполняемых операций:

1. Смазать цилиндрические пластиковые формы смазкой.
2. В емкость наливается эпоксидная смола необходимого объема.
3. Далее в емкость добавляется отвердитель. Вливать его необходимо медленно, тонкой струйкой. При работе с маленькими объемами смолы рекомендуется пользоваться шприцом для того, чтобы отмерить малые дозы отвердителя.
4. Незамедлительно приступить к перемешиванию, чтобы исключить бурную реакцию. Перемешивать деревянной палочкой в течение 5-7 минут, стараясь не допускать образования пузырьков воздуха.
5. Влить полученную смесь в форму и оставить полимеризоваться в течении 24 часов.
6. Извлечь образцы и провести механическую обработку для придания гладкой цилиндрической поверхности.

На рисунке 2 показаны образцы эпоксидных смол после полимеризации в пластиковых формах.



Рисунок 2 – Процесс производства образцов из эпоксидной смолы

## 2.3 Приготовление образцов из композитного материала

2.3.1 Образец №1 – Ручное формование с использованием эпоксидной смолы ЭД-20.

Приборы: смола ЭД-20, отвердитель ПЭПА, углеткань саржа 2/2 – 12К – 1000 – 400, восковая смазка Вc-M, ножницы, линейка, весы, пластиковый стаканчик, деревянные палочки, прижимной валик, поролоновый валик, перчатки, лавсановая пленка.

1. На подготовленную поверхность наносится разделительный слой – восковая смазка Вc-M (или лавсановая пленка);
2. Из углеткани вырезают листы квадратной формы;
3. В емкости смешивают эпоксидную смолу ЭД – 20 и отвердитель ПЭПА, в количестве 15% от массы смолы (выбор состава обоснован в п 3.1.1). Тщательно перемешивают;
4. На подготовленную поверхность наносят тонкий слой смолы;
5. Сверху кладется лист углеткани и прокатывается поролоновым валиком до появления следов смолы;



6. На слегка пропитанную ткань добавляется эпоксидная смола и снова распределяется валиком по ткани;
7. Процесс повторяется до выкладки четвертого листа ткани;
8. На последний (четвертый) слой наносится эпоксидная смола, распределяется, а затем сверху кладется лавсановая пленка;
9. Через лавсановую пленку будущий материал прокатывается прижимным валиком для того, чтобы пузырьки воздуха между слоями вышли, а смола лучше пропитала ткань;
10. Будущий композит следует нагрузить дополнительным весом;
11. Композиция отверждается в течение 24 часов;
12. После застывания изделие подвергается механической обработке.

На рисунке 2 представлен композитный материал, полученный методом ручного формования. Фото до застывания образца.



Рисунок 3 – Композитный материал, полученный методом ручного формования

2.3.2 Образец № 2 – Ручное формование с использованием эпоксидного компаунда Этал Карбон – 257У Light.

Процесс полностью совпадает с технологией изготовления образца №1, за исключением пропорций смешивания: 25% отвердителя от массы смолы (выбор состава обоснован в п 3.1.2).

2.3.3 Образец № 3 – Вакуумное формование с использованием смолы ЭД – 20.

Приборы: смола ЭД – 20, отвердитель ПЭПА, углеткань саржа 2/2 – 12К – 1000 – 400, восковая смазка Вс-М, ножницы, линейка, весы, пластиковый стаканчик, деревянные палочки, поролоновый валик, перчатки, лавсановая пленка, герметизирующий жгут, жертвенная ткань, проводящая сетка, вакуумная пленка, насос Value VE115N 57 л/мин, проводящая трубка, коннектор, зажим.

1. Начало технологии совпадает с методом ручного формования;
2. На четвертый слой ткани наносится эпоксидная смола, распределяется, а далее накладывается жертвенная ткань, проводящая сетка;
3. Вокруг рабочей области приклеивается герметизирующий жгут;
4. На жгут устанавливается коннектор, с одной стороны которого подключен насос, другой конец остается открыт для забора воздуха из мешка;
5. На жгут приклеивается вакуумная пленка;
6. После включения насоса необходимо откачать весь воздух из вакуумного мешка, а после перекрыть проводящую трубку с помощью зажимов и только затем выключить насос;
7. Композиция отверждается в течение 24 часов;
8. После застывания изделие подвергается механической обработке.

На рисунке 4 показан процесс создания вакуумного пакета.



а)



б)

Рисунок 4 – Создание вакуумного пакета: а) до включения насоса; б) после включения насоса

2.3.4 Образец № 4 – Вакуумное формование с использованием смолы Этал Карбон – 257У Light.

Пропорции смешивания: 25% отвердителя от массы смолы.

Процесс производства полностью совпадает с технологией образца № 3.

2.3.5 Образец № 5 – Вакуумная инфузия с использованием смолы Этал Карбон – 257У Light.

Приборы: смола ЭД – 20, углеткань саржа 2/2 – 12К – 1000 – 400, восковая смазка Вc-M, ножницы, линейка, весы, пластиковый стаканчик, деревянные палочки, перчатки, герметизирующий жгут, жертвенная ткань, проводящая сетка, вакуумная пленка, насос Value VE115N 57 л/мин, проводящая трубка, спиральная трубка, коннектор, зажимы.

1. На подготовленную поверхность наносится разделительный слой – восковая смазка Вc-M (или лавсановая пленка);
2. Из углеткани вырезают листы квадратной формы;
3. В емкости смешивают эпоксидный компаунд Этал Карбон – 257У Light, в количестве 25% от массы смолы (выбор состава обоснован в п 3.1.3). Тщательно перемешивают;

4. На подготовленную поверхность выкладывают сразу четыре слоя ткани, а сверху жертвенную ткань, проводящую сетку;
  5. Вокруг рабочей области приклеивается герметизирующий жгут;
  6. С одной стороны, на жгут устанавливается коннектор, одним концом подключенный к насосу, другим (свободным) – выходящим в вакуумный мешок;
  7. Со второй стороны на жгут устанавливается коннектор. Один конец подключается к проводящей трубке, которая опущена в емкость со смолой. Другая часть коннектора подключается к спиральной трубке. Она располагается по одной стороне мешка и служит для равномерного поступления смолы по всей длине ткани;
  8. На жгут приклеивается вакуумная пленка;
  9. Перед включением насоса перекрывается проводящая трубка, опущенная в смолу, и откачивается воздух из вакуумного мешка;
  10. После того как создан вакуум, снимаются зажимы, и смола начинает поступать в вакуумный пакет;
  11. Когда смола полностью пропитает ткань, проводящая трубка со смолой снова перекрывается; вакуумный насос продолжает работу;
  12. После некоторого времени перекрывается зажимами трубка от насоса, а затем выключается сам насос;
  13. Отверждение проходит в течение 24 часов;
  14. После застывания изделие подвергается механической обработке.
- На рисунке 5 показан процесс получения композитного материала методом вакуумной инфузии.



а)



б)

Рисунок 5 – Процесс вакуумной инфузии: а) начало процесса; б) конец процесса

2.3.6 Образец №6 – Вакуумное формование с использованием смолы ЭД – 16.

Пропорции смолы: 10% отвердителя ПЭПА от массы смолы (выбор состава обоснован в п 3.1.3).

Процесс производства полностью совпадает с технологией образца № 3, за исключением используемой ткани – выбрано плетение саржа 2/2 – 3К – 1000 – 200.

2.3.7 Образец № 7 – Вакуумная инфузия с использованием смолы ЭД – 20.

Пропорции смешивания: 15% отвердителя ПЭПА от массы смолы.

Процесс производства полностью совпадает с технологией образца № 5.

## 2.4 Изготовление цилиндрических форм для литья смолы

Формы для заливки цилиндрических образцов печатались на принтере ANYCUBIC Vyper с использованием PLA пластика.

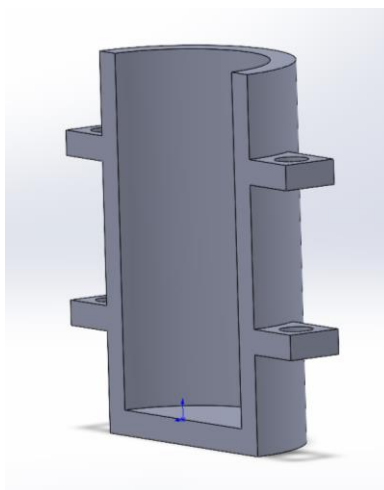


Рисунок 6 – 3Д-модель пластиковой формы

Размеры внутренней полости: радиус 11,3 мм; высота 42 мм; толщина стенки 3 мм.

Также были опробованы формы из фотополимера Anycubic Colored UV Resin, напечатанные на принтере Anycubic Photon Mono X.

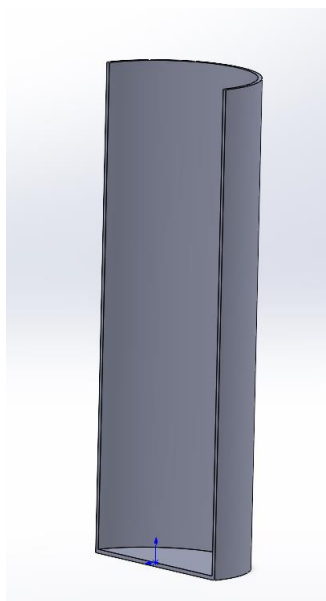


Рисунок 7 – 3Д-модель пластиковой формы

Размеры внутренней полости: радиус 11,3 мм; высота 61 мм; толщина стенки 0,5 мм.

Напечатанные формы скрепляются хомутами и промазываются силиконовым герметиком в местах стыка.

## 2.5 Методы исследования приготовленных образцов

### 2.5.1 Метод испытания на разрушающее напряжение при сжатии

Для испытаний на разрушающее напряжение при сжатии используется машина ИП 6011 – 500 – 1.

#### 1) Сущность метода

- Перед проведением испытания измеряют диаметр образца  $d$  и его высоту  $h$ ;
- Устанавливают приспособление для испытания на сжатие на подвижную траверсу;
- Подготовленный образец устанавливается на нижней плите строго по центру, между верхней плитой и образцом оставляют зазор в 5 – 10 мм;
- Показания испытательной машины обнуляются;
- Проводится нагружение, наблюдается деформация образца;
- Фиксируется наибольшая нагрузка в момент разрушения образца;
- Образец удаляется из зоны испытания, зона очищается
- Проводятся испытания остальных образцов по описанной схеме.

#### 2) Подготовка образцов

Образцы должны быть обточены со всех сторон, иметь гладкую поверхность, без сколов и трещин. Торцы образца должны быть параллельны друг другу и перпендикулярны оси.

#### 3) Обработка результатов

Предел прочности на сжатие ( $\sigma_{сж}$ ) в кгс/мм<sup>2</sup> вычисляют по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{S}, \quad (1)$$

где  $P$  – разрушающая нагрузка, кгс;

$S$  – площадь поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>.

Площадь поперечного сечения определялась по формуле:

$$S = \pi \cdot r^2, \quad (2)$$

где  $r$  – радиус поперечного сечения образца, см.

### 2.5.2 Метод испытания на разрушающее напряжение при растяжении

Испытания на растяжение проводятся на испытательных машинах по ГОСТ 56785-2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов».

#### 1) Сущность метода

Метод испытания заключается в растяжении образца ПКМ с постоянной скоростью нагружения или деформирования до момента разрыва.

#### 2) Подготовка образцов

Перед испытаниями образцы маркируют, измеряют толщину и ширину рабочей части образца в трех местах, выбирают меньшее значение. Испытания проводят при температуре  $(23 \pm 2)^\circ \text{C}$  и относительной влажности воздуха  $(50 \pm 10)\%$ .

#### 3) Обработка результатов

Образцы подвергают растяжению до разрушения. Зависимость удлинения образца  $\Delta \ell$  от величины растягивающей силы  $F$  автоматически фиксируется диаграммным аппаратом испытательной машины в виде графика. Полученную запись обрабатывают: определяют начало координат диаграммы растяжения  $F=f(\Delta \ell)$ , отмечают характерные точки диаграммы, по которым вычисляют механические характеристики материала.

С целью исключения влияния на механические характеристики материала размеров образца: начальной площади поперечного сечения  $A_0$  и первоначальной длины  $\ell_0$ , силу  $F$  пересчитывают в механическое напряжение

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad (3)$$

а удлинение  $\Delta \ell$  – в линейную деформацию



$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (4)$$

Получаемые по формуле (3) значения напряжений  $\sigma$  оказываются несколько меньше действительных значений  $\sigma_d$ , так как действующую силу относят к начальной площади  $A_0$  поперечного сечения образца, не учитывая уменьшения сечения при растяжении.

На рисунке 8 представлена диаграмма растяжения хрупкого материала.

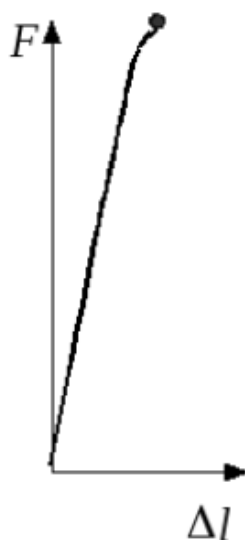


Рисунок 8 – Диаграмма растяжения хрупкого материала

В процессе испытания вид зависимости между удлинением  $\Delta l$  образца и растягивающей силой  $F$  несколько раз существенно изменяется, что позволяет выделить на диаграмме несколько характерных участков.

Из диаграммы видно, что отклонение от закона Гука начинается очень рано. Разрыв происходит при очень малых деформациях и без образования шейки.

При испытании на растяжение хрупких материалов определяют, как правило, только предел прочности. Обычно при практических расчетах для хрупких материалов отклонение от закона Гука не учитывают, т.е.

криволинейную диаграмму заменяют условной прямой и считают, что закон Гука применим на всем протяжении диаграммы.

При испытании на растяжение хрупких материалов определяют, как правило, только максимальную нагрузку  $F_{\max}$ .

Напряжение, при котором образец испытывает максимальную нагрузку  $F_{\max}$ , предшествующую разрушению, называется *пределом прочности*  $\sigma_{пч}$ :

$$\sigma_{пч} = \frac{F_{\max}}{A_0}. \quad (5)$$

Модуль упругости характеризует сопротивление материала, деформированного растяжением (сжатием) в упругой области.

Геометрический смысл модуля упругости – тангенс угла наклона начального участка диаграммы растяжения

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \sim \operatorname{tg} \alpha. \quad (6)$$

Физический смысл модуля упругости – напряжение, требующееся для удлинения стержня вдвое. Реально достижимые напряжения в упругой области деформирования примерно в тысячу раз меньше.

В данной главе приведены технологии получения композиционных материалов, описаны методики испытаний образцов при испытании на сжатие и растяжение.

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 3.1 Обоснование выбора рецептуры смесей

##### 3.1.1 Описание результатов при работе со смолой ЭД – 20



а)



б)



в)



г)

Рисунок 9 – образцы из эпоксидной смолы ЭД – 20 с содержанием отвердителя: а) 5%; б) 10%; в) 15%; г) 20%

Протокол результатов испытаний представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Протокол испытаний на сжатие

Номер образца	Соотношение компонентов		Площадь поперечного сечения образца, см <sup>2</sup>	Максимальная разрушающая нагрузка, кН	Предел прочности, МПа
	смола	отвердитель			
1	95	5	3,97	5,79	14,57
2	90	10	3,8	17,09	43,9
3	85	15	3,8	26,07	68,62

4	80	20	4,34	36,68	84,61
5	75	25	4,15	37,15	91,38

По данным таблицы 4 были построены графики зависимости прочности от процентного содержания отвердителя.

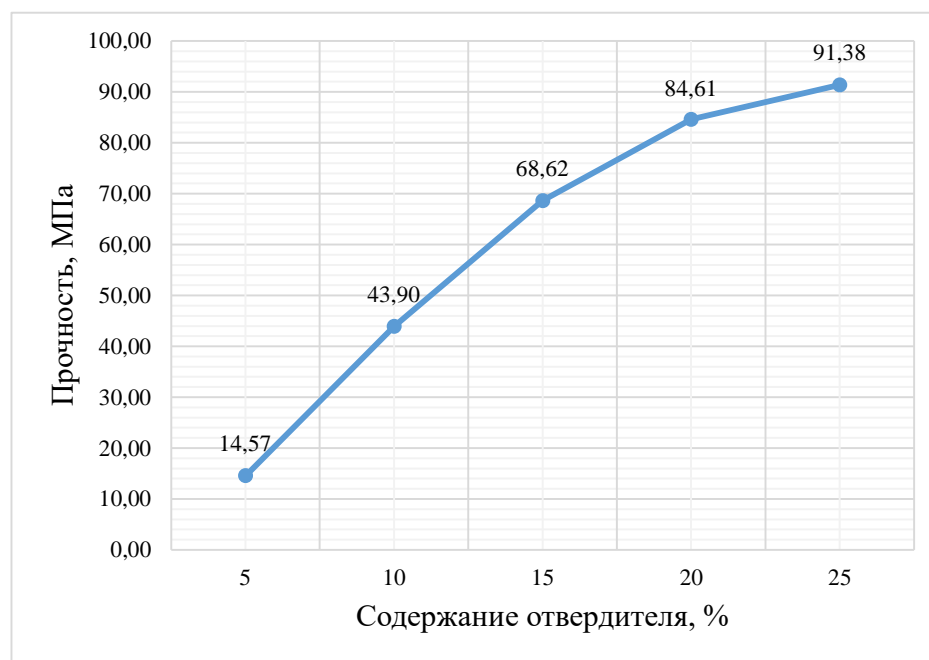


Рисунок 10 – График зависимости прочности от количества отвердителя для смолы ЭД – 20

1. При добавлении 5% отвердителя ПЭПА смола не затвердевает в течение нескольких суток;
2. При использовании 10 % отвердителя ПЭПА – как следует в инструкции – смола имеет прочность 43,9 МПа.
3. При повышении содержания до 15% происходит увеличение прочности – значение становится равным 68,62 Мпа.
4. При дальнейшем увеличении до 20% виден рост показателя прочности, но происходит самопроизвольный нагрев смолы, что является нарушением технологии. После застывания образцы с содержанием смолы выше 20% имеют ярко выраженный коричневый оттенок.

На основании представленных выводов для производства композитных материалов был выбран состав с 15% содержанием отвердителя.

### 3.1.2 Описание результатов при работе с эпоксидным компаундом Этал Карбон – 257У Light

Фотографии образцов, подготовленных для испытаний, представлены ниже.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 11 – образцы из эпоксидного компаунда Этал Карбон – 257У Light с содержанием отвердителя: а) 10%; б) 15%; в) 20%; г) 35%

Протокол результатов испытаний представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Протокол испытаний на сжатие

Номер образца	Соотношение компонентов		Площадь поперечного сечения образца, см <sup>2</sup>	Максимальная разрушающая нагрузка, кН	Предел прочности, МПа
	смола	отвердитель			
6	90	10	3,8	37,56	98,86
7	85	15	3,63	22,89	63,08
8	80	20	3,8	34,95	91,99
9	75	25	4,34	40,46	99,61
10	70	30	3,97	28,78	72,42
11	65	35	3,63	40,71	112,19

По данным таблицы 5 были построены графики зависимости прочности от процентного содержания отвердителя.

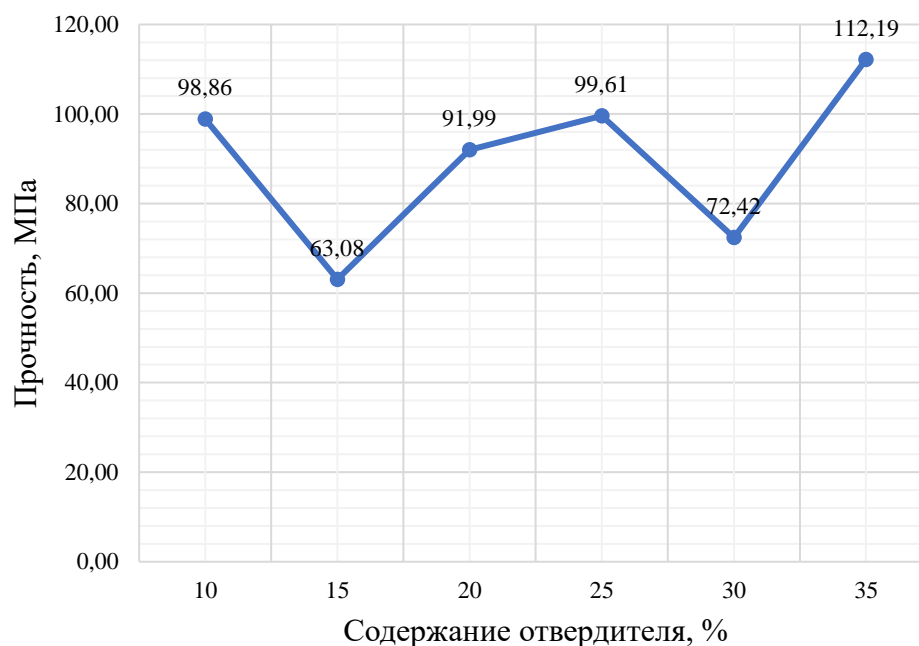


Рисунок 12 – График зависимости прочности от количества отвердителя для эпоксидного компаунда Этал Карбон – 257У Light

1. При работе с 10 и 15% образцы не застывали в течение нескольких суток;
2. При содержании 20 % отвердителя прочность составила 91,99 МПа;
3. При использовании 25% отвердителя прочность увеличивается и составляет 99,61 МПа;

4. Дальнейшее увеличение количества отвердителя ведет к уменьшению прочности – 72,42 МПа;

5. На графике показано, что после в точке 35% прочность снова увеличивается до значения 112,19 МПа. Такой подъем вызван тем, что смола нагрелась.

На основании представленных выводов для производства композитных материалов был выбран состав с содержанием отвердителя 25%.

### 3.1.3 Описание результатов при работе со смолой ЭД – 16



а)



б)

Рисунок 13 – образцы из эпоксидной смолы ЭД – 16 с содержанием отвердителя: а) 10%; б) 15%

Протокол результатов испытаний представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Протокол испытаний на сжатие

Номер образца	Соотношение компонентов		Площадь поперечного сечения образца, см <sup>2</sup>	Максимальная разрушающая нагрузка, кН	Предел прочности, МПа
	смола	отвердитель			
12	90	10	3,63	53,89	148,51
13	85	15	3,8	23,67	62,30
14	80	20	3,8	33,87	89,15
15	75	25	3,8	35,9	94,49

По данным таблицы 6 были построены графики зависимости прочности от процентного содержания отвердителя.

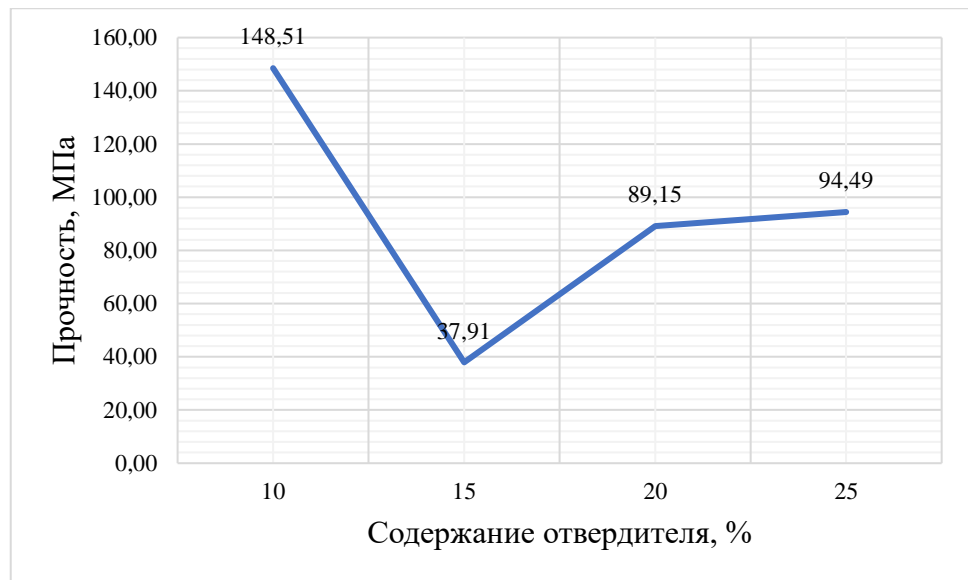


Рисунок 14 – График зависимости прочности от количества отвердителя для смолы ЭД – 16

1. Вследствие высокой вязкости смолы ЭД – 16 на работу с ней накладываются значительные ограничения;
2. При работе с 5% отвердителя ПЭПА смола имеет настолько вязкую консистенцию, что не удастся равномерно размешать компоненты;
3. При использовании 10% отвердителя – как рекомендуют в инструкции – смола становится менее вязкой и пригодной для работы. Прочность на сжатие у такого состава 148,51 МПа;
4. При 15% отмечается снижение показателя прочности;
5. Дальнейшее увеличение отвердителя повышает прочность, но приводит к самопроизвольному нагреву смолы, что является нарушением технологии;

На основании представленных выводов для производства композитных материалов был выбран состав с 10% содержанием отвердителя.



### 3.2 Результаты производства композитных материалов

Для испытаний на растяжение были подготовлены образцы с длиной 175 мм и шириной 25 мм в количестве 3 штук для каждого состава.

В таблице 7 приведены средние значения массы и толщины при разных способах изготовления среди образцов со следующими размерами: длина 175 мм, ширина 25 мм.

Таблица 7 – Значения массы и толщина изготовленных образцов

Способ изготовления	Номер образца	Масса, г	Толщина, мм
Ручное формование	1	9	1,74
	2	9	1,8
Вакуумное формование	3	12	2,1
	4	10	1,66
	6	25	4,62
Вакуумная инфузия	5	13	2,1

В таблице 8 приведены средние значения процентного содержания углеткани в композитных материалах

Таблица 8 – Процентное содержание углеткани в композитных материалах

	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4	Образец №5	Образец №6
Содержание, %	89	89	68	83	63	50

Для испытания образцов группы №1, 2 использовалась испытательная машина Instron 3369, а для образцов №3, 4, 5, 6 – Instron 8802.



Рисунок 15 – Процесс проведения испытаний на растяжение

### 3.2.1 Образец №1

Образец №1 был выполнен методом ручного формования из смолы ЭД – 20 и углеткани плетения 2/2 – 12К – 1000 – 400.



Рисунок 16 – Образец №1

Материал имеет шершавую поверхность с глянцевым блеском. При обработке материала в местах среза видны волокна ткани, что говорит о недостаточной пропитки этих участков.

Протокол испытаний приведен в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты испытаний на растяжение для образца №1

Образец	Скорость, мм/мин	Толщина, мм	Ширина, мм	Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Максимальное напряжение при растяжении, МПа	Максимальная нагрузка, Н	Автоматический модуль Юнга, ГПа
№1.1	2,00	1,70	25,03	42,55	325,22	13838,31	21,76
№1.2	2,00	1,76	25,80	45,41	263,55	11967,18	18,71
№1.3	2,00	1,76	25,05	44,09	315,12	13893,09	20,54
Среднее	2,00	1,74	25,29	44,02	301,30	13232,86	20,34



Рисунок 17 – Диаграмма деформирования образца №1.1

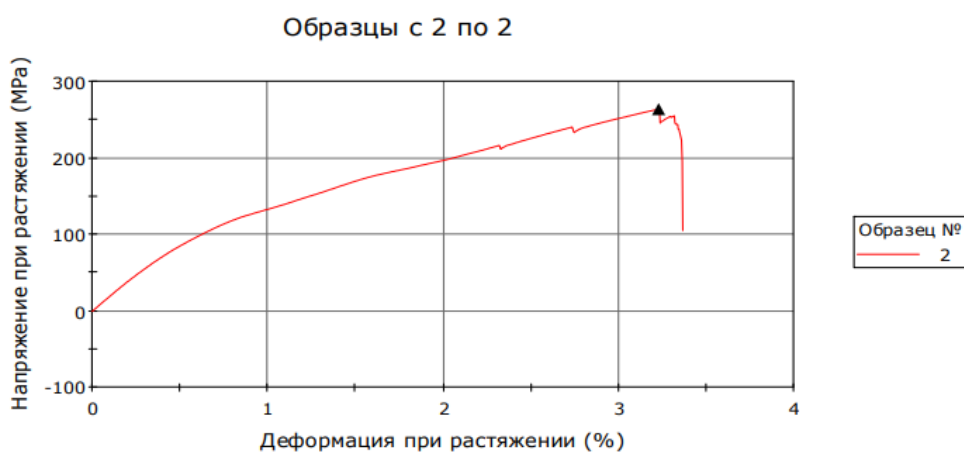


Рисунок 18 – Диаграмма деформирования образца №1.2



Рисунок 19 – Диаграмма деформирования образца №1.3

Таким образом, прочность при растяжении составила 301,30 МПа.



Рисунок 20 – Фото образцов группы №1 после испытания

### 3.2.2 Образец №2

Образец №2 был выполнен методом ручного формования из эпоксидного компаунда Этал Карбон – 257У Light и углеткани плетения 2/2 – 12К – 1000 – 400.



Рисунок 21 – Образец №2

На рисунке 16 видны непропитанные места, которые приводят к снижению прочности конструкции. Текстура материала шершавая, неоднородная, с глянцевым блеском. После механической обработки по краям среза видны сухие волокна.

Вследствие проскальзывания образца его ширина была уменьшена до 16 мм, благодаря чему удалось снять достоверные показания только с одного образца.

Протокол испытаний приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты испытаний на растяжение для образца №2.

Образец	Скорость, мм/мин	Толщина, мм	Ширина, мм	Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Максимальное напряжение при растяжении, МПа	Максимальная нагрузка, Н	Автоматический модуль Юнга, ГПа
№2.1	2,00	1,81	16,34	29,58	399,51	11815,67	26,06
Среднее	2,00	1,81	16,34	29,58	399,51	1181,67	26,06



Рисунок 22 – Диаграмма деформирования образца №2

Таким образом, прочность при растяжении составила 399,51 МПа.

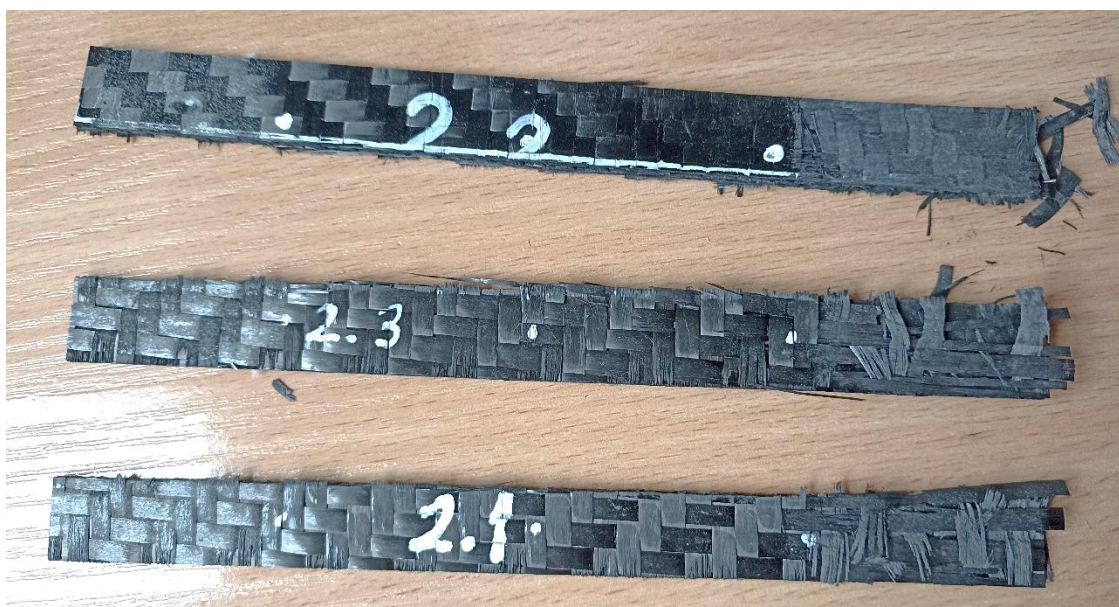


Рисунок 23 – Фото образцов группы №2 после испытаний (наблюдалось их проскальзывание)

### 3.2.3 Образец №3

Образец №3 был выполнен методом вакуумного формования из смолы ЭД – 20 и углеткани плетения 2/2 – 12К – 1000 – 400.



Рисунок 24 – Образец №3

При использовании вакуумного насоса отмечается повышение степени пропитки ткани. Материал имеет более ровную, гладкую поверхность в сравнении с ручной выкладкой. При механической обработке получается ровный срез.

Протокол испытаний приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты испытаний на растяжение для образца №3.

Образец	Скорость, мм/мин	Толщина, мм	Ширина, мм	Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Максимальное напряжение при растяжении, МПа	Максимальная нагрузка, Н	Автоматический модуль Юнга, ГПа
№3.1	2,00	2,09	25,05	52,35	456,30	23887,31	28,99
№3.2	2,00	2,18	25,70	56,03	487,10	27292,21	29,65
№3.3	2,00	1,97	25,10	49,45	497,80	24616,21	29,89
Среднее	2,00	2,08	25,28	52,61	480,40	25265,24	29,51

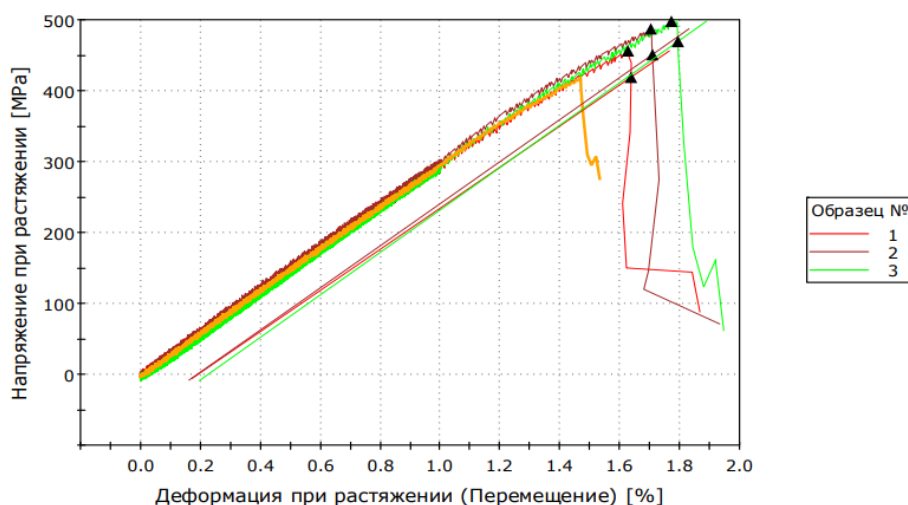


Рисунок 25 – Диаграмма деформирования образца №3

Таким образом, прочность при растяжении составила 480,4 МПа.



Рисунок 26 – Фото образцов группы №3 после испытаний

#### 3.2.4 Образец №4

Образец №4 был выполнен методом вакуумного формования из Этал Карбон – 257У Light и углеткани плетения 2/2 – 12К – 1000 – 400.



Рисунок 27 – Образец №4

В случае вакуумного формования образцы отличаются высокой степенью пропитки, меньшим количеством пор.

Протокол испытаний приведен в таблице 12.



Таблица 12 – Результаты испытаний на растяжение для образца №4.

Образец	Скорость, мм/мин	Толщина, мм	Ширина, мм	Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Максимальное напряжение при растяжении, МПа	Максимальная нагрузка, Н	Автоматический модуль Юнга, МПа
№4.1	2,00	1,65	25,00	41,25	602,90	24869,63	35,40
№4.2	2,00	1,66	24,96	41,43	486,10	20139,12	37,75
№4.3	2,00	1,69	25,02	42,28	398,60	16852,80	45,97
Среднее	2,00	1,67	24,99	41,73	495,90	20693,91	39,70

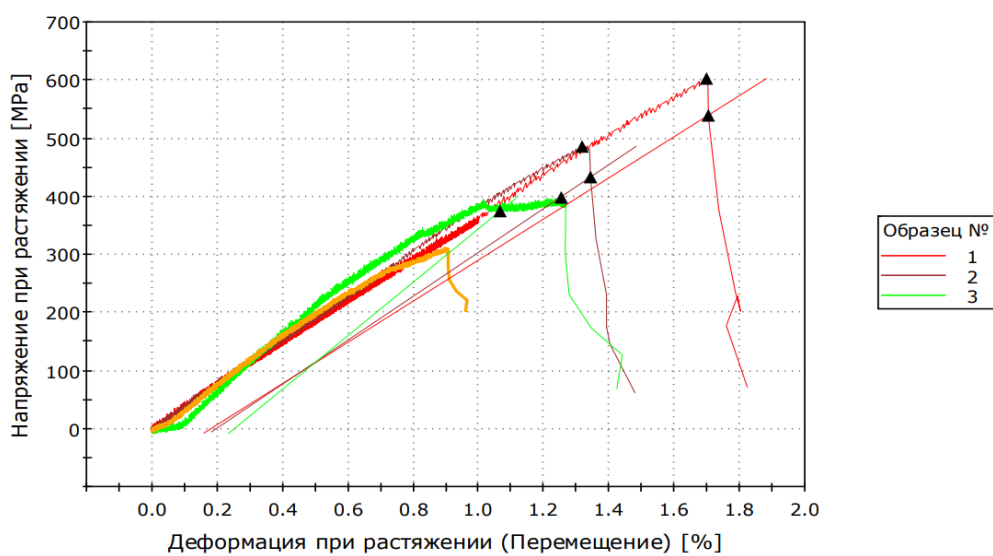


Рисунок 28 – Диаграмма деформирования образца №4

Таким образом, прочность при растяжении составила 495,9 МПа.



Рисунок 29 – Фото образцов группы №4 после испытаний

### 3.2.5 Образец №5

Образец №5 был выполнен методом вакуумной инфузии из Этал Карбон – 257У Light и углеткани плетения 2/2 – 12К – 1000 – 400.



Рисунок 30 – Образец №5

Этот материал отличается повышенной степенью пропитки. Поверхность гладкая, с наименьшим количеством пор.

Протокол испытаний приведен в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты испытаний на растяжение для образца №5.

Образец	Скорость, мм/мин	Толщина, мм	Ширина, мм	Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Максимальное напряжение при растяжении, МПа	Максимальная нагрузка, Н	Автоматический модуль Юнга, МПа
№5.1	2,00	2,07	25,02	51,79	512,20	26526,84	28,27
№5.2	2,00	2,10	25,3	53,13	450,00	23908,50	29,06
№5.3	2,00	2,09	24,9	52,04	347,9	18104,72	29,71
Среднее	2,00	2,09	25,07	52,40	436,7	22883,08	29,01

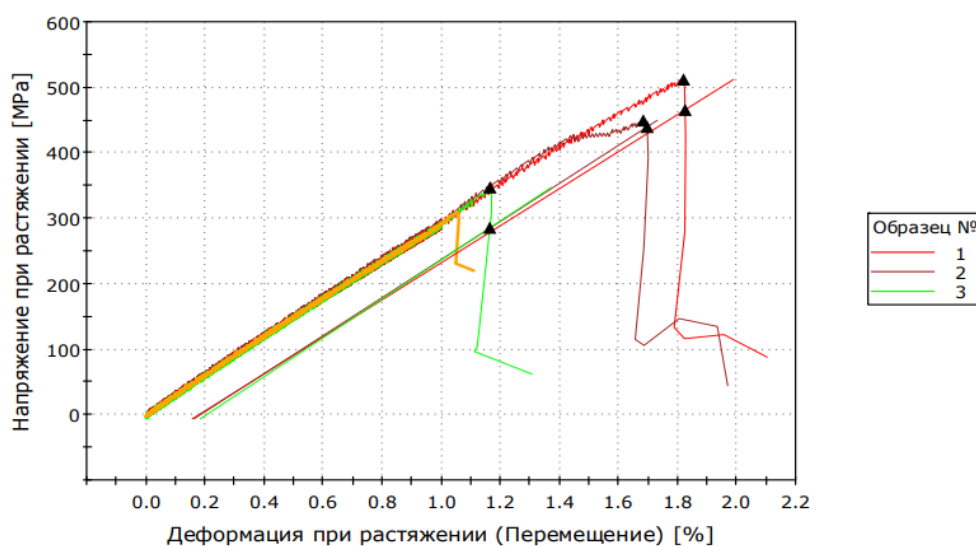


Рисунок 31 – Диаграмма деформирования образца №5

Таким образом, прочность при растяжении составила 436,7 МПа.



Рисунок 32 – Фото образцов группы №5 после испытаний

### 3.2.6 Образец №6

Образец №3 был выполнен методом вакуумного формования из смолы ЭД – 16 и углеткани плетения саржа 2/2 – 3К – 1000 – 200.

Для этого материала была выбрана более мелкий тип плетения ткани по причине того, что при использовании плетения 2/2 – 12К – 1000 – 400 волокна ткани рассыпались при попытке распределить слишком вязкую смолу ЭД – 16.



Рисунок 33 – Образец №6

При изготовлении этого образца возникали сложности с равномерным распределением смолы, оставались непропитанные участки, толщина материала и масса оказались значительно больше в сравнении с остальными способами. В материале присутствуют пузырьки воздуха. Для изготовления образца используется значительно большее количество смолы.

Протокол испытаний приведен в таблице 14.

Таблица 14 – Результаты испытаний на растяжение для образца №6.

Образец	Скорость, мм/мин	Толщина, мм	Ширина, мм	Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Максимальное напряжение при растяжении, МПа	Максимальная нагрузка, Н	Автоматический модуль Юнга, МПа
№6.1	2,00	4,83	24,96	120,56	44,9	5413,14	8,02
№6.2	2,00	4,31	25,06	108,00	33,4	3607,2	6,23
№6.3	2,00	4,62	25,03	115,64	107,9	12477,56	13,76
Среднее	2,00	4,59	25,02	114,84	62,1	7131,56	9,34

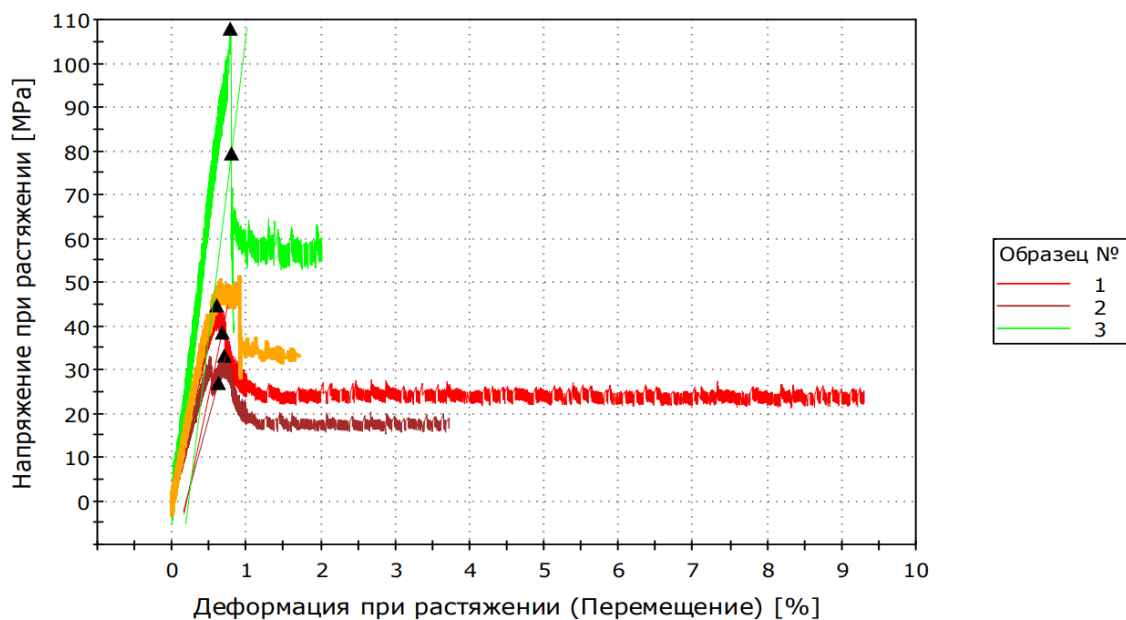


Рисунок 34 – Диаграмма деформирования образца №6

Таким образом, прочность при растяжении составила 62,1 МПа.



Рисунок 35 – Фото образцов группы №6 после испытаний

Итоговые результаты испытаний представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Итоговый отчет по проведенным испытаниям

Метод формования	Группа образцов	Предел прочности, МПа	Модуль Юнга, ГПа
Ручная выкладка	1	301,30	20,34
	2	399,51	26,06
Вакуумное формование	3	480,40	29,51
	4	495,90	39,70
	6	62,10	9,34
Вакуумная инфузия	5	436,70	29,01

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что наиболее универсальным методом формования является метод вакуумного формования. При использовании метода визуального анализа установлено, что образцы имеют гладкую структуру, с минимальным количеством пор и глянцевым блеском. Результаты испытаний на прочность указывают о максимальной прочности среди всех испытываемых методов. Вакуумное формование позволяет работать с большим разнообразием смол.

Метод вакуумной инфузии отличается высокими значениями прочности, но не превосходящими значения при методе вакуумного формования. При визуальном осмотре значительных отличий от метода вакуумного формования не выявлено. Кроме того, метод характеризуется большим расходом смолы.

Метод ручного формования значительно уступает описанным выше методам по значениям прочности и качеству получаемых образцов. Его преимуществом является более простая технология производства и отсутствие дорогостоящего оборудования, такого как насос и материалы для создания вакуумного мешка.

## 4 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

### 4.1 Вредные вещества

В работе использовались эпоксидные смолы, которые по своему строению представляют синтетическое олигомерное соединение на основе диглицидилового эфира дифенилолпропана. Эпоксидная смола не взрывоопасна, но горит при внесении в источник огня. Летучие компоненты – толуол и эпихлоргидрин относятся к веществам 2-го класса опасности по степени воздействия на организм человека.

Для отверждения эпоксидной смолы использовался отвердитель ПЭПА (полиэтиленполиамин). В результате смешения основного компонента с отвердителем, эпоксидная смола необратимо затвердевает и приобретает новые физико-химические свойства. Полиэтиленполиамин (ПЭПА) – темно-окрашенная жидкость плотностью 950...1050 кг/м<sup>3</sup> с резким запахом аммиака. Отвердитель полиэтиленполиамин относится к 3 классу опасности, поэтому очень важно соблюдать требования транспортировки и применять штатную транспортировочную тару.

### 4.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

В лаборатории могут присутствовать различные вредные и опасные факторы производства, в том числе потенциальная угроза электротравмы, токсические, раздражающие и сенсibiliзирующие эффекты вредных химических веществ, а также возможность повреждений кожи.

Для предупреждения поражения электрическим током, необходимо соблюдать правила электробезопасности, которые включают следующие меры:

- Проверять электропроводку на наличие возможных нарушений изоляции перед включением прибора в сеть;
- Немедленно отключать устройство от электрической сети и устранять неисправности при появлении признаков замыкания;

- Не трогать одновременно приборы с естественным заземлением, (радиаторы отопления, водопроводные краны и др.), когда устройство включено;
- Не использовать оборудование в помещениях с повышенной опасностью;
- Включать и выключать штепсельную вилку из розетки только при выключенном устройстве.

Существуют следующие способы защиты от поражения током в электроустановках:

- предохранительные устройства;
- защитное заземление;
- применение устройств защитного отключения;
- зануление.

Самый распространенный способ защиты от поражения током при эксплуатации измерительных приборов и устройств – защитное заземление, которое предназначено для превращения «замыкания электричества на корпус» в «замыкание тока на землю» для уменьшения напряжения прикосновения и напряжения шага до безопасных величин (выравнивание потенциала).

Несоблюдение норм безопасности при работе с эпоксидными смолами может привести к риску поражения. Это обусловлено тем, что такие смолы могут проникать в организм через кожу и дыхательные пути из-за наличия летучих компонентов, таких как эпихлоргидрин и толуол. Наиболее опасным является контакт кожи с этими веществами, что может привести к заболеваниям кожи и сенсibilизации. Дерматиты могут также вызывать раздражения глаз и дыхательных путей.

Для безопасной работы с эпоксидными смолами необходимо соблюдать требования ГОСТа 12.4.011 – 89 и использовать специальную защитную одежду и индивидуальные средства защиты. Работы следует производить в помещениях с приточно-вытяжной вентиляцией и местной вытяжной вентиляцией, которые должны быть установлены таким образом, чтобы



летучие вещества не попадали в зону дыхания работников. Контроль за состоянием воздушной среды должен производиться в соответствии с ГОСТом 12.1.005 - 88.

Если возникнут брызги смол, их необходимо сразу же удалить сухими марлевыми тампонами, а затем обработать этиловым спиртом и помыть водой с мылом. Для дальнейшего обезболивания и лечения обработанное место следует смазать мягкой мазью на основе ланолина, вазелина или касторового масла.

Для выполнения работ с использованием эпоксидных смол и материалов на их основе необходимо надевать защитную спецодежду.

С целью защиты кожи рук от воздействия эпоксидных смол, лаборант должен использовать резиновые перчатки в сочетании с нитяными или полиэтиленовыми перчатками на бязевой подкладке. В случае возможного незначительного загрязнения рук неотвержденными эпоксидными смолами и композициями на их основе, на кожу рук следует наносить специальные защитные пасты. Не стоит использовать пасты, содержащие жировые вещества, так как эпоксисоединения и отвердители растворимы в жирах.

#### **4.3 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя**

Рабочее место должно обеспечивать удобство при выполнении работ в различных положениях - сидя или стоя. Выбор положения должен зависеть от:

- тяжести работ;
- размеров рабочей зоны и необходимости передвижения;
- технологических особенностей процесса (точность действий, чередование пассивного наблюдения и физических действий, ведение записи и т.д.).

При выполнении работ, которые требуют постоянного контроля технологического процесса (например, синтез смол, приготовление компаундов, пропитка наполнителей смолами или прессование), необходимо иметь возможность менять рабочую позу с положения "стоя" на "сидя".

Рабочая зона должна быть расположена в пределах доступности моторного поля для выполнения трудовых операций. Выполнение операций "часто" и "очень часто" должно обеспечиваться зоной легкой досягаемости и в оптимальной зоне моторного поля.

Проектирование оборудования и организация рабочего места должны учитывать антропометрические особенности работника. Построение рабочего места и конструкция оборудования должны позволять работнику находиться в прямом и свободном положении тела или наклонять его вперед не более, чем на 15 градусов.

Конструкция производственного оборудования и организация рабочего места должны обеспечивать оптимальное положение для работника, которое может быть достигнуто путем регулирования высоты рабочей поверхности.

При выборе помещения необходимо учитывать, что каждый работник должен иметь не менее 4,5 м<sup>2</sup> площади служебного помещения. В данной научно-исследовательской работе задействованы только два человека: научный руководитель и студент-исполнитель. Однако, при выборе помещения необходимо также учитывать возможность размещения оборудования, такого как персональные ЭВМ, принтеры, лабораторное оборудование и т.д. Скопление технических средств и оборудования в небольшом помещении может негативно сказаться на микроклимате и условиях труда, приводя к утомляемости. Поэтому необходимо провести расчет площади на каждого сотрудника, работающего за компьютером, согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организация работы», норма ведется от 4,5 м<sup>2</sup>. Кроме того, помещение должно иметь хорошую вентиляцию или быть обеспечено кондиционерами. Если используются скоростные копировальные и печатающие устройства, предъявляются сверхвысокие требования к вентиляции.

Правильное освещение рабочих мест имеет большое значение, поскольку недостаток света может приводить к быстрой утомляемости. Естественное освещение считается наилучшим, важно, чтобы свет падал слева или спереди.

Искусственное освещение может быть общим (светильники на потолке) или местным (с настольной лампой на каждом рабочем месте), и должно быть достаточным по уровню и равномерности освещения. При использовании компьютеров, светильники общего освещения следует устанавливать в верхней части стенных панелей для предотвращения бликов на экране.

Рекомендуется поддерживать температуру в помещении на уровне 22–24 °С и влажность в диапазоне 40 – 60%.

При размещении рабочего места и оборудования необходимо учитывать стандартные размеры проходов:

- между рабочим столом и отопительными приборами – 55 см;
- между стеной и столом – 65 см.

Лучше не располагать экран дисплея напротив окна и не сидеть лицом к окну, когда работаете на дисплее. Габариты мебели должны соответствовать площади помещения, чтобы не создавать переполненности.

Все эти требования к рабочему месту были учтены при выполнении научно-исследовательской работы.

## 5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В данной главе будет проведена экономическая составляющая выпускной квалификационной работы, а именно расчет себестоимости разработанных композитных материалов и проведение их испытаний.

Производственная себестоимость изделия определяется по статье калькуляции, точным методом на основе нормативов использованных материальных и трудовых затрат, связанных с процессом производства продукции. В общем виде, расчет производственной себестоимости производится по следующей формуле:

$$C = M + T + Y + L_0 + L_d + L_{CH}, \quad (7)$$

где М – затраты на материалы;

Т – затраты на транспортно-заготовительные расходы;

У – затраты на услуги по изготовлению;

$L_0$  – основная заработная плата;

$L_d$  – дополнительная заработная плата;

$L_{CH}$  – отчисления на социальные нужды.

### 5.1 Покупные комплектующие материалы

Таблица 16 – Покупные комплектующие материалы

№ п/п	Наименование	Количество	Стоимость, у.е.
1	Одноступенчатый вакуумный насос масляный Value VE115N 57 л/мин	1	4586
2	Углеродная ткань 400 г./м2/12К саржа 2×2 (1000 мм)	2	6328
3	Смола ЭД – 20 (1 кг) с отвердителем ПЭПА (100 гр)	2	3504
4	Смола ЭД – 16 (1 кг)	2	5300
5	Смола Этал Карбон – 257У Light (1,4 кг)	2	5285
6	Жертвенная ткань (полиэстер) 85 г/м2, до 180°С, 180 см, м <sup>2</sup>	3	585

7	Вакуумная пленка желтая, до 160°C, 65 $\mu$ m, 120 см, м <sup>2</sup>	3	294
8	Проводящая сетка 160 г/м <sup>2</sup> , зеленая, до 140°C, 200 см, м <sup>2</sup>	3	420
9	Герметизирующий жгут 671, 15 метров, до 120°C, рулон	1	450
10	Трубка вакуумная 10/12 мм, 1 пог.м	4	308
11	Трубка спиральная 8/10, 1 пог.м	4	232
12	Коннектор I, 10 мм, 1 шт	8	280
13	Прижимной резиновый валик STAYER 40 мм d36 мм бюгель 6 мм	1	227
14	Валик поролон 65 мм	1	203
15	Кисть флейцевая 35 мм	2	218
16	Смазка восковая Вc-M	1	310
17	Салфетки влажные	1	57
18	Лопатки для перемешивания 500 шт	1	480
19	Хомуты 2,5×150 100 шт	1	64
20	Посуда разовая Стакан 100 мл 10 шт	3	48
21	Посуда разовая Стакан 200 мл 10 шт	3	71
22	Герметик 115 мл Красс Универсальный	1	240
23	Перчатки виниловые прозрачные 100 шт	1	285
24	Шприц 5 мл	3	42
25	Шприц 3 мл	3	36
26	Перчатки х/б 1 пара	1	49
27	Шлифовальные листы P2000	2	110
28	Ножницы закройные 210 мм	1	250
39	Весы кухонные	1	400
Итого:			30662

Таким образом, затраты на материалы составили  $M=30662$  у.е.

## 5.2 Транспортно-заготовительные расходы

Затраты на доставку материалов до г. Благовещенска и отправку образцов на испытания в г. Барнаул составили  $T=4957$  у.е.

## 5.3 Затраты на услуги по изготовлению

Для производства композитных материалов были заказы услуги по резке материалов, стоимость которых составила  $Y=1200$  у.е.

## 5.4 Основная заработная плата

Основная заработная плата будет рассчитываться для младшего научного сотрудника. Трудоемкость производства композитных материалов составляет 40

часов, которые понадобятся сотруднику, чтобы создать материал и подготовить его к механическим испытаниям.

Младший научный сотрудник имеет часовую тарифную ставку 250 у.е. Отталкиваясь от этого, произведем расчет заработной платы:

$$L_0 = 1,2 \cdot t_{\text{изд}} \cdot e, \quad (8)$$

где 1,2 – коэффициент, учитывающий премии;

$t_{\text{изд}}$  – трудоемкость изготовления изделия;

$e$  – тарифная ставка за час работы.

Отсюда следует, что заработная плата младшего научного сотрудника составляет:  $L_0 = 1,2 \cdot 40 \cdot 250 = 12000$  у.е.

Также необходимо учитывать дополнительную заработную плату рабочим, которая составляет 12% от основной заработной платы. В данном случае дополнительная заработная плата младшего научного сотрудника составляет:

$$L_d = 1,12 \cdot L_0 = 13340 \text{ у.е.} \quad (9)$$

## 5.5 Страховые взносы

Любой работодатель каждый месяц платит различные страховые взносы с выплат своим сотрудникам. Если они работают по трудовому договору, то это взносы: на обязательное пенсионное страхование; на обязательное медицинское страхование; на социальное страхование от болезней и травм или по материнству; на страхование от несчастных случаев и профессиональных заболеваний.

На 2023 год по основному тарифу на обязательное пенсионное страхование идет 22% от зарплаты, на медицинское страхование — 5,1%, в

ФСС — 2,9%. В сумме — 30%. Тогда отчисления на социальные службы младшему научному сотруднику составляют:

$$L_{CH} = (L_D + L_0) \cdot 0,3 = 7632 \text{ у.е.} \quad (10)$$

Рассчитав все величины, входящие в формулу 7, определим себестоимость композитного материала:

$$C = 30662 + 4957 + 12000 + 13440 + 7632 = 68691 \text{ у.е.}$$

В данной главе был произведен экономический расчет себестоимости изготовления композитных материалов. Сумма получена с учетом оплаты материальных и трудовых затрат, и составила 68691 у.е.

### 5.6 Сравнение стоимости композитов при использовании различных видов смол

Анализ проводится для метода ручного формования.

В таблице 17 представлены материалы, требующиеся для производства методом ручного формования, имеющие одинаковую стоимость для обеих смол (ЭД – 20, Этал Карбон – 257У Light).

Таблица 17 – Материалы для производства методом ручного формования

Наименование товара	Стоимость единицы товара, у.е.	Стоимость товара на производство одной пластины 100 мм×100 мм, у.е.
Углеродная ткань 400 г./м <sup>2</sup> /12К саржа 2×2 (1000 мм)	3164	1265,6
Прижимной резиновый валик STAYER 40 мм d36 мм бюгель 6 мм	227	227
Валик поролон 65 мм	203	203
Кисть флейцевая 35 мм	218	218
Смазка восковая Вc-M	310	310
Лопатки для перемешивания 500 шт	480	2,88
Посуда разовая Стакан 200 мл 10 шт	23,6	2,36
Перчатки виниловые прозрачные 100 шт	285	11,4
Ножницы закройные 210 мм	250	250
	Итого	2490,24

Таблица 18 – Стоимость эпоксидных смол

Наименование товара	Стоимость единицы товара, у.е.	Стоимость товара на производство одной пластины 100 мм×100 мм, у.е.
Смола ЭД – 20 (1 кг) с отвердителем ПЭПА (100 гр)	1752	350,4
Смола Этал Карбон – 257У Light (1,4 кг)	2642,5	377,5

Таблица 19 – Общая стоимость композитных материалов

Используемая смола	Стоимость смолы, у.е	Стоимость остальных материалов, у.е	Общая стоимость, у.е.
ЭД – 20	350,4	2490,24	2840,64
Этал Карбон – 257У Light	377,5	2490,24	2867,74

Таким образом, стоимость композитных материалов с использованием двух видов смол практически равна и составила около 2850 у.е.

При использовании методов вакуумного формования и вакуумной инфузии стоимость композитных материалов будет увеличиваться пропорционально в виду использования одних и тех же материалов для создания вакуума и проводящих каналов.

Расчет для смолы ЭД – 16 не проводился вследствие низких характеристик материала.

Для производства композитных материалов рекомендуется использовать эпоксидный компаунд Этал Карбон – 257У Light вследствие его относительно низкой стоимости и высоких прочностных характеристик.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы были рассмотрены основные характеристики наполнителей и матричных материалов, методы получения композитных материалов. Исходя из данного анализа для производства композитных материалов были выбраны: углеродные ткани плетения саржа 2/2 – 12К – 1000 – 400 и саржа 2/2 – 3К – 1000 – 200; матричные материалы – эпоксидно-диановые смолы ЭД – 20 и ЭД – 16, эпоксидный компаунд Этал Карбон – 257У Light.

В результате исследования трех марок эпоксидных смол с различным содержанием отвердителя получены оптимальные соотношения смолы и отвердителя. Оптимальные соотношения, найденные экспериментальным путем, следующие: смола ЭД – 20 – 85%, отвердитель ПЭПА – 15%; смола Этал – 257У – 75%, отвердитель Этал – 45 – 25%; смола ЭД – 16 – 90%, отвердитель – 10%.

Проведен сравнительный анализ трех разработанных методов формования: ручного формования, вакуумного формования и вакуумной инфузии. В ходе анализа установлено:

1. Работа методом ручного формования отличается простотой технологии, минимальным количеством закупочных материалов. Образцы получают пористые, местами непропитанные. Механические характеристики для смолы ЭД – 20: предел прочности – 301,30 МПа; модуль Юнга – 20,34 ГПа; для эпоксидного компаунда Этал Карбон – 257У Light: предел прочности – 399,51 МПа; модуль Юнга – 26,06 ГПа;

2. При работе методом вакуумного формования удалось создать образцы со всеми тремя тестируемыми смолами. Этот метод отличается более трудозатратой технологией, но позволяет получить образцы с глянцевой поверхностью, минимальным количеством пор. Механические характеристики для смолы ЭД – 20: предел прочности – 480,4 МПа; модуль Юнга – 29,51 ГПа; для эпоксидного компаунда Этал Карбон – 257У Light: предел прочности –

494,9 МПа; модуль Юнга – 39,70 ГПа; для смолы ЭД – 16: предел прочности – 62,1 МПа; модуль Юнга – 9,34 ГПа;

3. Метод вакуумной инфузии неэффективен при использовании выбранных смол и вакуумного насоса. При использовании смолы ЭД – 20 и ЭД – 16 не хватило мощности насоса для пропитки ткани, а образец с эпоксидным компаундом Этал Карбон – 257У Light не превосходит по своим характеристикам образец, полученный методом вакуумной инфузии. Механические характеристики для эпоксидного компаунда Этал Карбон – 257У Light: предел прочности – 436,7 МПа; модуль Юнга – 29,01 ГПа;

При анализе трех видов смол установлено, что

1. Смола ЭД – 16 не пригодна для производства углепластиков с любым плетением ткани в связи с повышенной густотой;

2. Смола ЭД – 20 подходит для работы только двумя методами формования из трех, но позволяет получить образцы с высокими физико-механическими характеристиками;

3. Эпоксидный компаунд Этал Карбон – 257У Light является универсальным, вследствие высокой текучести и превосходящих физико-механических характеристик.

Экономический расчет затрат на изготовление затрат показал низкую стоимость, которая составила 68691 у.е. Сравнение стоимости в зависимости от типа смолы показало, что композитные материалы с использованием выбранных смол имеют практически равную стоимость.

На основании представленных выводов рекомендуется использовать эпоксидный компаунд Этал Карбон – 257У Light, так как он обладает достаточно низкой стоимостью, высокими механическими характеристиками и превосходит остальные смолы по удобству использования. Кроме того, смола ЭД – 20 также подходит для производства композитных материалов, но уступает лишь в том, что она пригодна для меньших способов выкладки. А именно при работе с вакуумной инфузией появляются сложности в пропитки ткани из-за незначительной вязкости смолы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Забережный, С.А. Технология получения углепластиковых пластин / С.А. Забережный, М.Б. Исмаилов, Б.А. Байсериков // Журнал «Комплексное использование минерального сырья» – 2016. – Выпуск №3 – 4 с.

2 Вакуумная инфузия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://composite.ru/tehnologii/infusion1/#materials> (Дата обращения 26.05.2023).

3 Вакуумное формование и вакуумная инфузия изделий из стеклопластика и углепластика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://patlah.ru/etm/etm-08/tuning/vakyym/vakyym-0.htm> (Дата обращения 26.05.2023).

4 Корнилова, Л.И. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Вязущие вещества». Испытание органических вязущих веществ / Л.И. Корнилова – Казань, КазГАСУ; 2008, –18с.

5 ГОСТ 10587–84 Смолы эпоксидно-диановые. Неотвержденные. Москва: издательство стандартов.

6 ГОСТ 56785-2015 Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов.

7 Васильев, В.В. Механика конструкций из композиционных материалов/ В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.

8 Михеев, С.В. Керамические и композиционные материалы в авиационной технике. / С.В. Михеев, Г.Б. Строганов, А.Г. Ромашин –М., Альтекс, 2002, – 276 с.

9 Бондалетова Л.И. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие / Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.

10 ГОСТ 12.4.011-89. ССБТ. Средства защиты работающих. – М.: Изд-во стандартов. С. 2-6.

11 ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

12 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – М.: Минздрав России, 2003. – 56 с.

13 Афонин О. Д. Лабораторный практикум по прикладной механике: учебное пособие / О. Д. Афонин, А. Н. Луцко, М. Д. Телепнев, О. В. Сташевская; под ред. Н. А. Марцулевича. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2021. – 144 с.

14 Казанцев, В.Г. Определение физико-механических характеристик материалов при испытании на растяжение и сжатие: методические рекомендации к выполнению лабораторных работ по курсам «Сопротивление материалов», «Техническая механика» и «Прикладная механика» для студентов всех специальностей и форм обучения / В.Г. Казанцев, В.Д. Миляев, К.В. Шестаков, Н.Н. Фаддеенков, М.П. Карпутин; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2014. – 98 с.