

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Российский химико-технологический университет  
имени Д.И. Менделеева»**

На правах рукописи



**Хлаинг Зо У**

**Композиционные материалы на основе винилсодержащих  
эпоксидных смол**

05.17.06 Технология и переработка полимеров и композитов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Научный руководитель профессор, доктор технических наук  
Осипчик Владимир Семенович

Научный консультант доцент, кандидат технических наук  
Костромина Наталья Васильевна

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Сидоров Олег Иванович начальник лаборатории Федерального государственного унитарного предприятия «Федеральный центр двойных технологий «Союз» (ФГУП «ФЦДТ «Союз»)

доцент, кандидат технических наук Скопинцев Игорь Викторович профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет»

Ведущая организация Акционерное общество «Межотраслевой институт переработки пластмасс – НПО «Пластик»

Защита состоится «25» ноября 2021 г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета РХТУ.05.04 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047 г. Москва, Миусская пл., 9) в конференц-зале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://diss.muotr.ru> федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета РХТУ.05.04

кандидат химических наук, доцент Биличенко Юлия Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Полимерные композиционные материалы на основе эпоксидных связующих отличаются высокой адгезией, небольшой усадкой при отверждении, теплостойкостью, улучшенными технологическими возможностями во время переработки в изделия и многими другими ценными свойствами. Это обеспечивает широкий спектр использования данных композитов в качестве ремонтных компаундов, герметизирующих составов и для многих других целей. Эпоксидным полимерам присуща существенная хрупкость, что создает препятствия для их использования в изделиях, работающих в сложных напряженных условиях. В связи с этим создание связующих и композиционных материалов на основе эпоксидных олигомеров, обладающих улучшенным комплексом физико-механических свойств, является актуальной задачей.

**Целью настоящей диссертации** является разработка композиционных материалов на основе модифицированных поливинилацетатами эпоксидных олигомеров с улучшенными деформационно-прочностными характеристиками. В соответствии с этим в диссертационной работе проводились исследования по следующим направлениям: изучение влияния модификаторов различной природы на процесс отверждения эпоксидных олигомеров и структуру образующейся полимерной сетки; разработка композиционных материалов на основе модифицированных нанонаполненных эпоксидных олигомеров с улучшенными свойствами.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

- разработаны методы модификации эпоксидных олигомеров с использованием поливинилацетатей, что позволило получить связующие с улучшенными характеристиками;
- установлено, что в процессе отверждения эпоксидных олигомеров, содержащих поливинилацетаты, возможно управлять структурой образующихся продуктов, их физико-механическими характеристиками, а также ускорить процесс образования сетчатых полимеров;
- выявлено, что введение графена способствуют диссипации механической энергии и, как следствие, повышению ударной вязкости модифицированного эпоксидного связующего;

- показано, что характер изменения прочностных свойств и температур стеклования полученных нанокомпозитов коррелирует с геометрической формой углеродных наночастиц, а не с их удельной поверхностью.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Проведены исследования влияния различных винилсодержащих модификаторов на физико-механические, термомеханические свойства и морфологию эпоксидных композиций. Показано, что применение эпоксидных олигомеров, модифицированных поливинилацетатами, имеет принципиальное значение для создания полимерных материалов с улучшенными механическими и теплофизическими свойствами, обеспечивающими их широкое применение. Разработаны композиционные материалы на основе винилсодержащих эпоксидных олигомеров с нанонаполнителями (графен, углеродные нанотрубки, фуллерены), обладающие широким спектром прочностных и деформационных характеристик. Разработана препреговая технология получения армированных эпоксидных материалов, обладающих повышенной стойкостью к растрескиванию, прочностью при изгибе и ударной вязкостью.

**Методология и методы исследования.**

Для формирования матрицы использовалась эпоксидиановая смола марки ЭД-20 с массовой долей эпоксидных групп 21.3% производства «ФКП Завод им. Я.М. Свердлова», г. Дзержинск. В качестве модификаторов использован винифлекс производства ФГУП НИИ Полимеров имени академика В.А. Каргина (ГОСТ 15874-81) и поливинилбутираль (ГОСТ 9439-85) производства компании Снабтехмет, г. Москва. Отверждение эпоксидных олигомеров проводилось действием промышленного отвердителя марки «Арамин» (ТУ 2415 – 164 – 05786904 – 02) производства АО НПО «Стеклопластик». В качестве наполнителей были использованы углеродные нанотрубки (УНТ) с удельной поверхностью 277 м<sup>2</sup>/г, графен с удельной поверхностью 1685 м<sup>2</sup>/г и фуллерен С<sub>60</sub> с удельной поверхностью 48 м<sup>2</sup>/г (компания ООО «С-Плюс»). Для создания армированных композитных материалов на основе модифицированной эпоксидной смолы использовали арамидную ткань Twaron 2200.

Ударную вязкость по Шарпи для полученных композиционных материалов определяли на приборе «Динстат» №1893-57-30. Прочность при сжатии определяли

для образцов композиционных материалов по ГОСТ 4651-82 при скорости деформирования  $10 \text{ мм} \times \text{мин}^{-1}$  на приборе «WPM Rauenstein», на котором также определяли прочность при изгибе по ГОСТ 4648-2014. Для построения термомеханических кривых использовали консистометр Хепплера марки «Rheotest KD 3.1». Введение углеродных наночастиц в ЭД-20 осуществляли с использованием ультразвукового диспергатора МОД МЭФ 91.

Исследование кинетики процесса термоокислительной деструкции проводилось методами ТГ-ДТА на приборе NETZSCH F3 Jupiter. ИК-спектры поглощения были измерены на ИК-фурье-спектрометре VERTEX 70v (Bruker, ФРГ).  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{31}\text{P}$  ЯМР-спектры регистрировали на спектрометре Bruker СХР, 200 MHz. Морфологию и структуру поверхности материалов исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEOL JSM-6510LV. Определение технологических и эксплуатационных свойств полученных композиционных материалов проводили по стандартным методикам согласно требованиям соответствующих ГОСТ.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

-разработка композиционных материалов с повышенными физико-химическими свойствами на основе эпоксидных олигомеров, модифицированных поливинилацетатами;

-исследование процессов формирования сетчатых структур эпоксидных полимеров и влияние на эти процессы поливинилацетатей;

-изучение влияния наномодификаторов различной геометрической формы на технологические и физико-химические свойства структурированных винилсодержащих эпоксидов;

-отработка технологии получения наномодифицированных армированных арамидными тканями композитов с высокой ударной прочностью и трещиностойкостью.

**Достоверность и апробация полученных результатов.** Достоверность результатов подтверждается согласованностью с общепринятыми теоретическими положениями, а также применением современных методов исследований, таких как, термогравиметрический анализ, метод ДСК, сканирующая электронная микроскопия,

инфракрасная и ЯМР спектроскопия.

Основные результаты работы доложены и обсуждены на: XIV, XV и XVI Международных конгрессах молодых ученых по химии и химической технологии «МКХТ - 2018», «МКХТ - 2019» и «МКХТ - 2020», г. Москва; XXI Международной конференции по материаловедению и разработке полимеров «ICMSPE-2019» (9-10 декабря 2019 г. Нью-Йорк, США); V Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием «Современные технологии композиционных материалов» (15 – 17 апреля, 2020 г.), г. Уфа, Башкирский государственный университет; XCV студенческой международной научно-практической конференции «Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки», г. Новосибирск, 2020 г.

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ, в том числе 3 статьи, индексируемых в международной базе Scopus, 1 статья в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, тезисы 9 докладов.

**Объем и структура работы:** Диссертация состоит из введения, литературного обзора, характеристики объектов и методов исследования, результатов и их обсуждения, выводов, списка литературы. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста, иллюстрирована 43 рисунками и 18 таблицами.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В первой главе - введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель, научная новизна и ее практическая значимость.

Во второй главе представлен обзор научных публикаций, посвященный модификации эпоксидных олигомеров.

В третьей главе описаны методология и методы исследования.

В четвертой главе приводится обсуждение полученных результатов.

### **4.1. Модификация эпоксидной смолы ЭД-20 поливинилацетатами**

Совмещение эпоксидных смол с полимерами других классов позволяет создавать широкий спектр материалов, удовлетворяющих разнообразным требованиям, предъявляемым в многочисленных отраслях промышленности. Однако, представленная в научно-технической литературе информация по эпоксидным смолам, модифицированным поливинилацетатами, носит отрывочный характер. С

целью разработки связующих на основе эпоксидиановой смолы ЭД-20 с улучшенными ударными свойствами, регулируемые технологическими и эксплуатационными характеристиками в качестве модификаторов были выбраны поливинилформальдегид (винифлекс-ВФ) и поливинилбутираль (ПВБ).

Для отверждения эпоксидной смолы был выбран отвердитель Арамин, представляющий собой смесь ароматического и алифатического аминов. Была подобрана концентрация Арамина- 42 м.ч. на 100 м.ч. ЭД-20. Полученные ИК-спектры показали, что при взаимодействии ЭД-20 и Арамина наблюдается исчезновение в спектре полос поглощения  $915$  и  $715\text{ см}^{-1}$ , что можно отнести к колебаниям эпоксидного трехчленного цикла, который раскрывается в процессе отверждения ЭД-20 и подтверждает химическое взаимодействие ЭД-20 и Арамина при образовании отверждённого продукта.

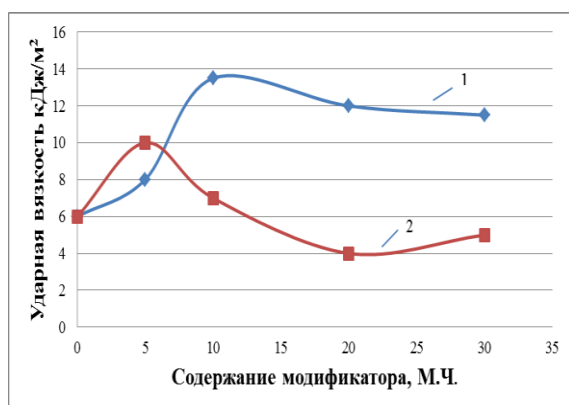


Рисунок 1 - Зависимость ударной вязкости связующего на основе ЭД-20 от содержания модификатора (1- ВФ, 2 - ПВБ)

Видно (Рисунок 1), что при добавлении винифлекса наблюдается значительное возрастание ударной вязкости композиции ЭД-20+Арамин+ВФ (10м.ч.), которое в 2,5 раза выше по сравнению с результатами композиции без ВФ. Максимальное увеличение ударной вязкости на 70% наблюдается для композиции ЭД-20+Арамин+ПВБ (5 м.ч.) по сравнению с исходной. Также было показано, что введение ВФ и ПВБ в небольших концентрациях снижает прочностные характеристики при изгибе и сжатии системы ЭД-20+Арамин.

Исследование степени отверждения модифицированных эпоксидных смол методами экстракции показало, как видно из рисунка 2, что введение поливинилацетата в количестве более 7-10 м.ч. нецелесообразно. Поливинилацетат

можно представить в виде соединений, содержащих три вида функциональных групп: ацетальные, гидроксильные и ацетатные. Согласно литературным данным, гидроксильные группы являются реакционноспособными при повышенных температурах и способны взаимодействовать со вторичными гидроксильными группами эпоксидной смолы. По-видимому, из-за пространственного фактора, а также в результате повышения вязкости систем при увеличенном содержании модификатора в связующем происходит снижение степени отверждения.

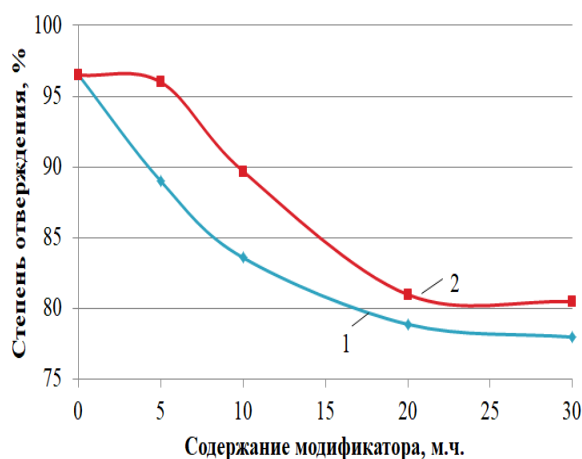


Рисунок 2 - Зависимость степени отверждения связующего на основе ЭД-20 от содержания модификатора (1- ВФ, 2 - ПВБ)

По данным термомеханического анализа и температуре стеклования ( $T_{ст}$ ) была оценена кинетическая гибкость цепи, определена молекулярная масса между узлами сшивки и плотность структурной сетки. Наблюдалось повышение температуры стеклования на  $25^{\circ}\text{C}$  при введении ВФ до 10 м.ч. и некоторое снижение  $T_{ст}$  при содержании 5-7 м.ч. ПВБ в эпоксидном связующем. Также влияние ПВБ проявлялось в снижении плотности сшивки ЭД-20. Введение ВФ в ЭД-20 в концентрациях до 10 м.ч. увеличивает плотность сшивки, вместе с тем, при увеличении содержания ВФ плотность сшивки снижается.

Таким образом, результаты проведенных физико-химических исследований показывают, что конечные отвержденные структуры представляют собой сложные системы, состоящие не только из исходных компонентов, но и из продуктов взаимодействия функциональных групп ЭД-20 с функциональными группами поливинилацеталей. Термомеханические кривые показывают рост деформации при увеличении содержания поливинилацеталей и небольшой разброс значений  $T_{ст}$ .



Результаты исследования термостойкости, изученной методом ТГА, показали, что температура начала деструкции для композиции с ПВБ на 32°C выше исходной отвержденной смолы ЭД-20. Из кривых ДТГА следовало, что температура максимальной скорости разложения исследованных образцов практически одинакова и составляет порядка 380°C.

Таким образом, в результате проведенных исследований выбраны оптимальные количества введенных в эпоксидную смолу ЭД-20 поливинилацеталей: ПВБ -5м.ч. и ВФ -10 м.ч. Было показано, что полученные связующие обладают повышенной ударной вязкостью – более чем в 2 раза, особенно в случае введения винифлекса, а значения прочности при изгибе и сжатии несколько снижаются. Это предопределило проведение дальнейших исследований по модификации разработанных связующих с использованием нанодобавок, в качестве которых были выбраны углеродные нанодобавки различной геометрической формы и удельной поверхности.

## **4.2. Введение нанодобавок в модифицированную эпоксидную смолу**

### **4.2.1. Закономерности изменения свойств модифицированной поливинилбутиралем эпоксидной смолы при введении нанодобавок**

В работе для улучшения свойств винилсодержащих эпоксидных смол были применены углеродные нанодобавки различной геометрической формы: нанотрубки, фуллерены, графен. Было исследовано их влияние на прочностные показатели и свойства образующейся сетки. На рисунке 3 показано, что улучшение ударной вязкости почти на 50% модифицированной ПВБ эпоксидной композиции наблюдается в основном при введении графена (0,1 мас.%), что может быть связано с его более равномерным распределением по сравнению с другими наночастицами за счет большей удельной поверхности, а также возможностью расщепления агрегированных чешуек графена при ультразвуковой обработке суспензии с эпоксидной смолой.

Увеличение прочности при изгибе наблюдается при введении всех вводимых нанодобавок, в основном при их концентрации от 0,05 до 0,1 мас.%.

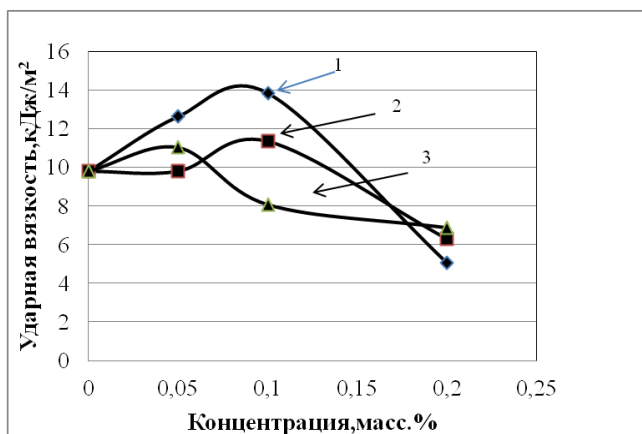


Рисунок 3 - Зависимость ударной вязкости эпоксидного связующего ЭД-20 +Арамин +ПВБ (5 м.ч.) от количества нанодобавок (1-графен, 2-УНТ, 3-фуллерен)

Наибольшее увеличение прочности при изгибе от 60 до 125 МПа наблюдается в композициях при введении графена и в меньшей степени для композитов с фуллереном и нанотрубками (Рисунок 4). Прочность при сжатии модифицированного ПВБ эпоксидного связующего имеет тенденцию небольшого повышения для композиций со всеми введенными нанодобавками.

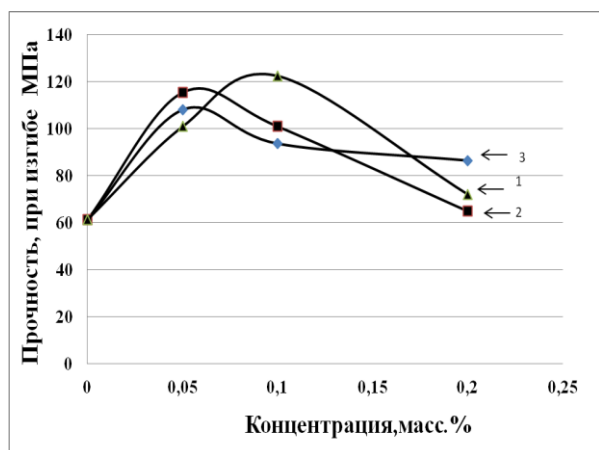


Рисунок 4 - Зависимость прочности при изгибе эпоксидного связующего ЭД-20+Арамин +ПВБ (5 м.ч.) от количества нанодобавок (1-графен, 2-УНТ, 3-фуллерен)

При изучении термомеханических кривых полученных композиций показано, что температура стеклования ( $T_{ст}$ ) систем, модифицированных нанодобавками (0,1 мас.%) снижается, возрастает молекулярная масса кинетического сегмента цепи  $M_c$  и снижается плотность сшивки. Показано, что введение малых количеств нанодобавок не оказывает существенного влияния на процессы отверждения связующих. Максимальный модуль высокоэластичности (6,1 МПа) наблюдается в композициях при введении графена по сравнению с другими введенными наночастицами.

При изучении морфологии и структуры разработанных композитов (Рисунок 5)

выявлено равномерное распределение графена в эпоксидной матрице, что особенно хорошо видно при большом увеличении (Рисунок 5.3). Это, по-видимому, позволяет получать композиты на его основе с более высокими прочностными показателями.

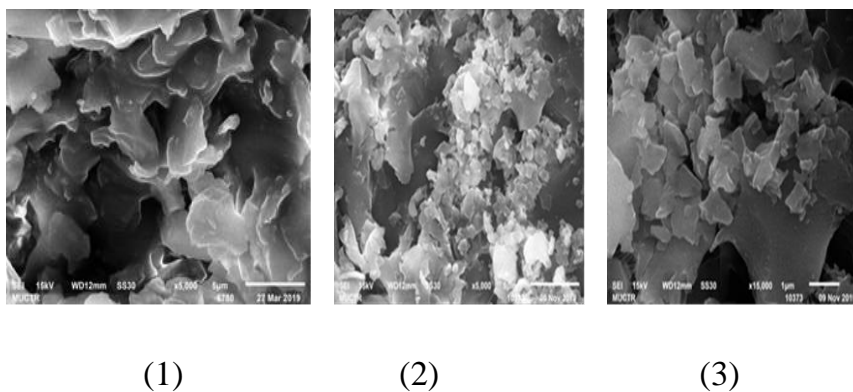


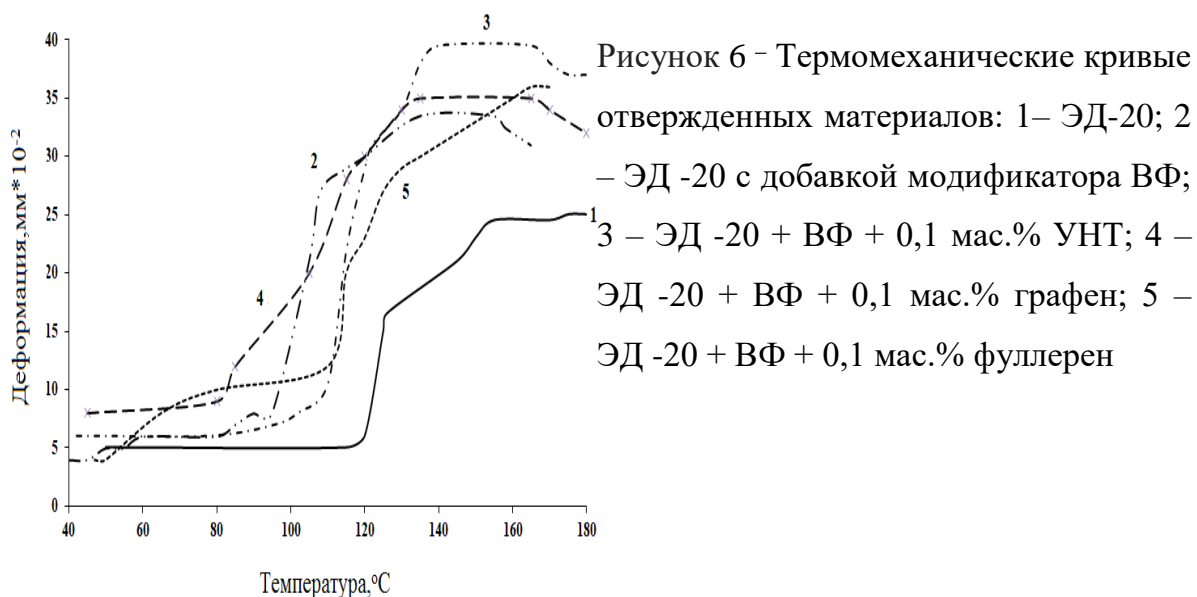
Рисунок 5 - Микрофотографии модифицированной эпоксидной композиции: 1–ЭД-20+ Арамин+ ПВБ (5м.ч.), x 5000; 2–ЭД-20+ Арамин +ПВБ (5м.ч.)+графен (0,1мас.%), x 5000; 3–ЭД-20+Арамин+ ПВБ (5м.ч.)+ графен (0,1мас.%), x 15000

Таким образом, показано, что введение нанодобавок, в количестве 0,1 мас.% в модифицированное поливинилбутиралем эпоксидное связующее ЭД-20 позволяет увеличить ударные характеристики композиции приблизительно на 60%, а также прочность при изгибе почти в два раза (особенно при введении графена).

#### **4.2.2. Свойства модифицированной винифлексом эпоксидной смолы при введении нанодобавок**

Изменение температуры стеклования отвержденной эпоксидной смолы при введении различных добавок может служить мерой изменения интенсивности сегментального движения, которая, в первую очередь, определяется величиной свободного объема. Введение модификатора ВФ приводит к снижению температуры стеклования почти на 20 градусов наномодифицированной композиции, что является, вероятно, следствием увеличения свободного объема при микрофазном разделении. Различие термомеханических кривых отвержденных эпоксидных олигомеров, модифицированных винифлексом, вызванное различными углеродными

наноструктурами, можно объяснить их геометрическими особенностями (Рисунок 6).



Значения модуля высокоэластичности при температуре стеклования составляли 1,9; 2,9; 3,5 и 4,1 МПа для отвержденных композиций на основе эпоксидных олигомеров, модифицированных ВФ, не содержащих наполнителя и наполненных 0,1 мас.% углеродных нанотрубок, графена, фуллерена  $C_{60}$  соответственно.

Определение морфологии отвержденных эпоксидных смол, модифицированных ВФ и наполненных различными углеродными наносистемами (Рисунок 7), показало, что использование графена в качестве добавки приводит к выходу плоскостей на поверхность (Рисунок 7Б) и является следствием рыхлой упаковки наноструктур при их случайной взаимной ориентации. При введении углеродных нанотрубок наблюдается образование разнонаправленных продолговатых структур (Рисунок 7А), предположительно связанных с распределением эпоксидного полимера вдоль хаотически расположенных нанотрубок. При использовании в качестве наполнителя фуллерена  $C_{60}$  наблюдается наибольшая шероховатость поверхности матрицы (Рисунок 7В), которая может быть результатом ранее отмеченного фазового разделения винифлекса и эпоксидных олигомеров в процессе отверждения.

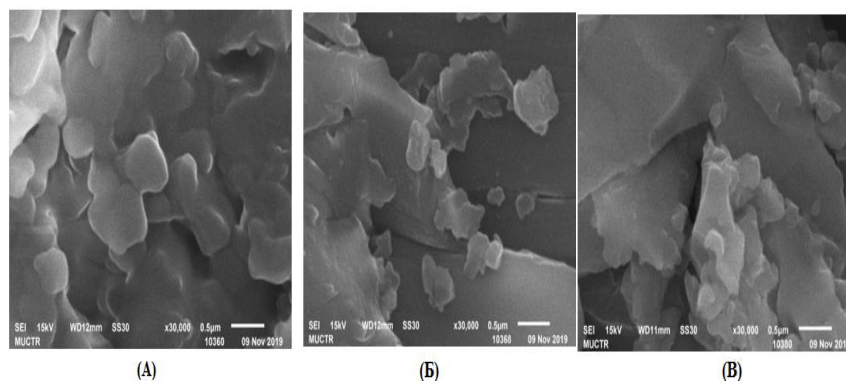


Рисунок 7 – Электронные микрофотографии ЭД-20, модифицированной ВФ и наполненной 0,1 мас. %: А – УНТ; Б–графен; В– фуллерен

Показано, что значительный свободный объем и большая удельная поверхность графена способствуют диссипации механической энергии, т.е. повышению ударной вязкости. Максимальное значение ударной вязкости наблюдается при наполнении матрицы 0,1 мас. % графена. Увеличение его количества в композиционном материале приводит к уменьшению ударной вязкости, что, вероятно, связано с развитием агломерации, свойственной графену (Рисунок 8). Углеродные нанотрубки в количестве 0,2 мас. % несколько повышают ударную вязкость. Введение фуллеренов, напротив, приводит к уменьшению ударной вязкости, что согласуется с фазовым разделением эпоксидных олигомеров и винифлекса. Также наименьшая ударная вязкость при наполнении фуллерена  $C_{60}$ , по всей видимости, связана с высокой температурой стеклования, которая указывает на наименьшее значение свободного объема в этом случае. Таким образом, данные термомеханического анализа согласуются с характером изменения ударной вязкости.

Прочность полученных композиционных материалов при изгибе также зависит от формы используемых для наполнения углеродных наноструктур и, как следствие, возрастает с увеличением их анизодиаметричности. Уменьшение прочности при изгибе в результате увеличения концентрации углеродных наноструктур в эпоксидной матрице выше 0,1 мас. % может быть объяснено образованием агломератов. Хотя удельная поверхность графена более чем в шесть раз превосходит удельную поверхность углеродных нанотрубок, значения прочности при изгибе оказываются весьма близкими.

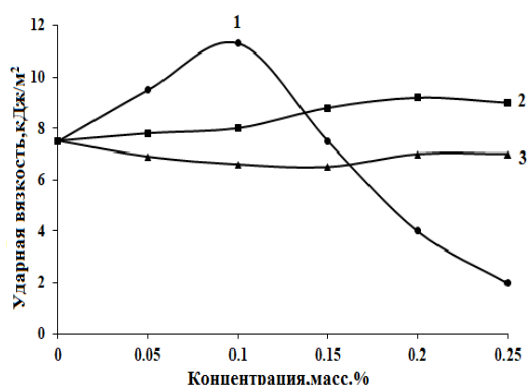


Рисунок 8 – Зависимость ударной вязкости нанокomпозиционных материалов на основе ЭД-20, модифицированной винифлексом, от концентрации нанодобавок (1– графен; 2 – УНТ; 3–фуллерен)

При наполнении эпоксидной матрицы 0,1 мас.% фуллереном  $C_{60}$  и графеном наблюдается максимальная прочность при сжатии даже при наличии отмеченного ранее фазового разделения эпоксидных олигомеров и винифлекса.

Показано, что характер изменения прочностных свойств и температур стеклования полученных нанокomпозитов значительно в большей степени коррелирует с геометрической формой углеродных наночастиц, чем с их удельной поверхностью. При изучении ударной вязкости композиций ЭД-20 с поливинилацетатами при введении графена после выдержки при  $-30^{\circ}C$  в течение 60 суток показано снижение данного показателя в меньшей степени при введении ПВБ.

#### 4.3. Композиционные материалы на основе модифицированной армированной эпоксидной смолы

Полимерные материалы, армированные высокопрочными высокомодульными минеральными и органическими волокнами, занимают особое место среди широко применяемых в современных отраслях техники композиционных материалов в связи с тем, что они обладают наиболее высокими удельными показателями физико – механических свойств. В последнее время появились способы модификации наночастицами армированных волокон композиционных материалов.

В работе отработана методика изготовления экспериментальных образцов ЭД-20 – композитов по препреговой технологии. На диаграммах 1 и 2 представлены свойства образцов ЭД-20, модифицированных поливинилацетатами, с добавками различных углеродных нанодобавок (0,1 мас.%) на основе 8 слоев арамидной ткани.

Видно, что для композиций на основе арамидной ткани вклад нанодобавок в возрастание ударных характеристик модифицированной как ВФ, так и ПВБ эпоксидной смолы приблизительно одинаков.

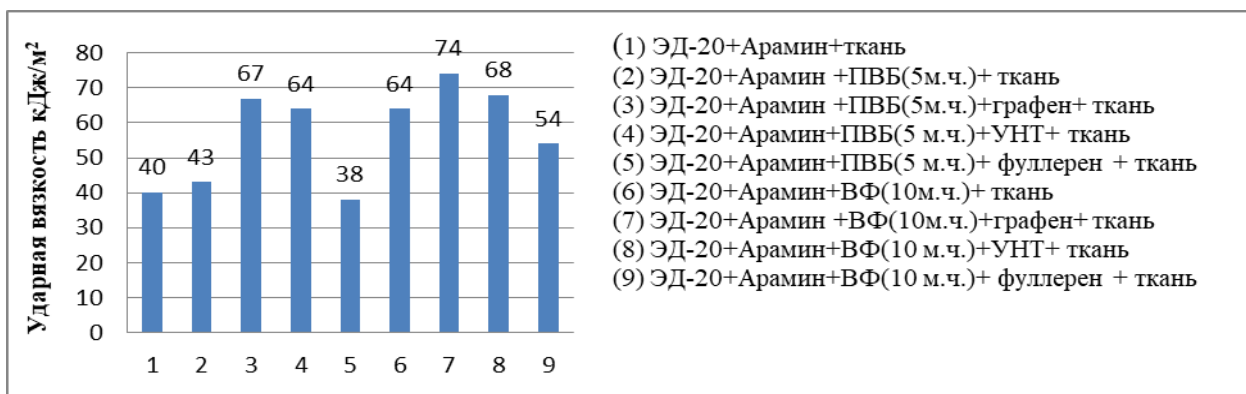


Диаграмма 1-Ударная вязкость композиций на основе модифицированной ЭД-20 и арамидной ткани

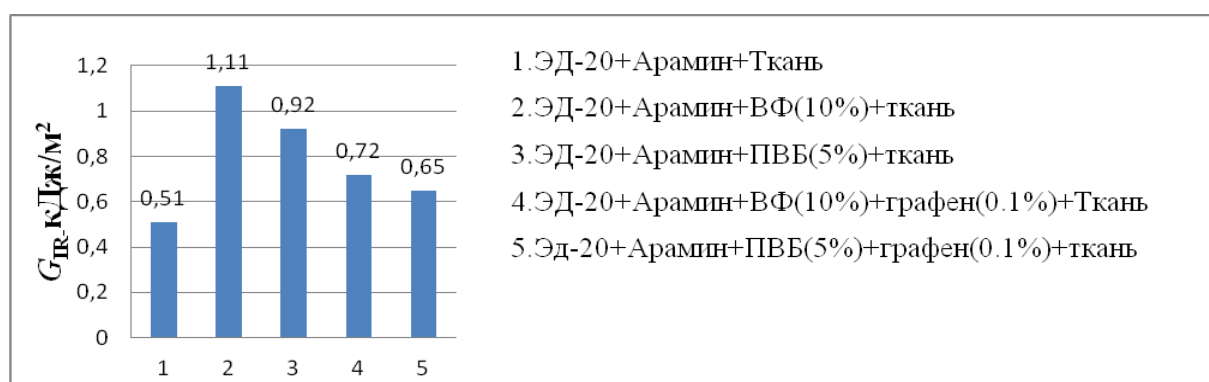


Диаграмма 2-Параметр трещиностойкости GIR композиций на основе модифицированной ЭД-20 и арамидной ткани

Лучшие ударные характеристики наблюдаются при введении УНТ и графена. Ударная вязкость возрастает на 60% при введении графена в модифицированный ПВБ композит на основе ЭД-20 и на 15% в модифицированный винифлексом композит (Диаграмма 1). Возрастает также прочность при изгибе.

В работе показано, что изменение ударной вязкости композитов на основе ЭД-20 при воздействии УФ-излучения в течение 125 часов в меньшей степени наблюдается при введении графена и УНТ при модификации ПВБ.

Большое внимание в работе уделено изучению устойчивости к растрескиванию армированных нанокомпозитов на основе ЭД-20 (Диаграмма 2). Практически для всех полученных композиционных материалов параметр трещиностойкости GIR существенно возрастает по сравнению с исходной армированной композицией.

Таким образом, показана возможность направленного регулирования эксплуатационных свойств эпоксидных композитов за счет создания армированных композиционных материалов на основе модифицированного эпоксидного связующего

с добавками нанонаполнителей.

### **Выводы**

1. Показано, что отверждение связующего, состоящего из эпоксидной смолы, аминного отвердителя Арамин и поливинилацеталей, представляет собой сложный процесс. При этом меняются параметры сетки химических связей, физико-механические характеристики и температура стеклования композиций. Выбрана концентрация вводимых модификаторов в эпоксидное связующее: ПВБ-5м.ч., винифлекс-10 м.ч., ударная вязкость композиций возрастает более чем в 2 раза.

2. Установлено, что введение нанодобавок в количестве 0,1 мас.% в модифицированное поливинилбутиралем эпоксидное связующее ЭД-20 позволяет увеличить ударные характеристики композиции приблизительно на 60% и прочность при изгибе почти в два раза.

3. Показано, что введение углеродных нанодобавок в количестве 0,1-0,25 мас.% в модифицированную эпоксидную смолу приводит к значительному изменению характера зависимости прочностных свойств и температуры стеклования полученных нанокомпозитов и коррелирует с геометрической формой углеродных наночастиц, а не с их удельной поверхностью.

4. Установлена возможность направленного регулирования эксплуатационных свойств эпоксидных композитов за счет создания армированных композиционных материалов на основе модифицированного эпоксидного связующего с добавками нанонаполнителей.

5. Разработаны армированные композиционные материалы на основе модифицированного нанонаполненного эпоксидного связующего и установлено, что они обладают повышенными эксплуатационными, деформационно-прочностными свойствами, стойкостью к трещинообразованию. Результаты подтверждены положительными испытаниями в ООО «ПЛЭКСПЛАСТ».

6. Показаны перспективы дальнейшей разработки новых эпоксидных нанокомпозитов функционального назначения. Разработанные композиционные материалы на основе модифицированного армированного эпоксидного полимера могут быть рекомендованы в качестве ударопрочных и защитных материалов в различных отраслях техники.



### Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Osipchik V. S., Hlaing Zo U, Kostromina N. V., Kravchenko T. P., Mezhuhev Ya. O. Development of corrosion-resistant materials using ED-20 epoxy resin modified with viniflex // Polymer Science, Series D. – 2021. – Vol. 14. – № 2. – pp. 205-207. (Scopus, Квартиль 2)
2. Kostromina N., Hlaing Zawoo, Osipchik V., Kravchenko T., Yakovleva K., Baranova M., Mezhuhev Ya. The Influence of the Geometric Shape of Carbon Nanoparticles on the Strength Properties of Nanocomposite Materials Obtained by Filling an Epoxy Matrix // Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics. – 2020. – Vol 59. – Issue 10. – PP. 648-658. (Scopus, Квартиль 3)
3. Костромина Н.В., Олихова Ю.В., Хлаинг Зо У, Осипчик В.С., Кравченко Т.П. Модификация эпоксидной смолы ЭД-20 поливинилформальэтилатом // Пластические массы. – 2020. – № 9-10. – С. 56-58. (Scopus, Chemical Abstracts)
4. Хлаинг Зо У, Костромина Н.В., Осипчик В.С., Кравченко Т.П., Яковлева К.А., Влияние углеродных наномодификаторов на свойства связующего на основе эпоксидной смолы ЭД-20 // Химическая промышленность сегодня. – 2020. – № 2. – С. 69-72. (ВАК, Chemical Abstracts)
5. Hlaing Zaw Oo, Kostromina N., Osipchik V., Kravchenko T., Yakovleva K. Investigation of the Properties of Epoxy Modified Binders Based on Epoxy Oligomer with Improved Deformation and Strength Properties // World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Materials and Metallurgical Engineering. – 2019. – Vol. 13. – № 11. – PP. 544-547.
6. Елбакиева А.В., Хлаинг Зо У, Трегубенко М.В., Костромина Н.В., Ивашкина В.Н. Свойства эпоксидных связующих, модифицированных поливинилформальэтилатом // Успехи в химии и химической технологии. Сборник научных трудов. – 2018. Том XXXII. – № 6 (202). – М: РХТУ им. Д.И. Менделеева. – С. 32-34.
7. Малаховский С.С., Хлаинг З.У., Репина А.А., Костромина Н.В. Модифицированные связующие на основе эпоксидного олигомера, устойчивые к повышенным ударным нагрузкам // Успехи в химии и химической технологии. – 2019. – Т. 33. – № 6 (216). – С. 59-61.
8. Хлаинг З.У., Злобина А.В., Костромина Н.В., Осипчик В.С. Свойства полимерных

смесей ЭД-20 и поливинилбутирала // Успехи в химии и химической технологии. – 2019. – Т. 33. – № 6 (216). – С. 97-99.

9. Хлаинг З.У., Яковлева К.А., Костромина Н.В. Свойства модифицированной эпоксидной смолы ЭД-20 // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – Т. 34. – № 7 (230). – С. 114-116.

10. Яковлева К.А., Костромина Н.В., Хлаинг Зо У, Елбакиева А.В. Изучение свойств модифицированного эпоксидного связующего ЭД-20 / В сборнике: Современные технологии композиционных материалов: материалы V Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием (15 – 17 апреля, 2020г.). – Уфа: Башкирский государственный университет, 2020. – С. 105.

11. Дьякова Ю.Г., Ацапина С.А., Зверевич Ю.К., Хлаинг Зо У, Костромина Н.В. Исследование свойств препрегов на основе СВМ и модифицированного эпоксидного связующего / Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: Электронный сборник статей по материалам ХСV студенческой международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд. ООО «СибАК», 2020. – № 11(94). [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://sibac.info/archive/technic/11%2894%29.pdf>

12. Ацапина С.А., Зверевич Ю.К., Дьякова Ю.Г., Хлаинг Зо У, Костромина Н.В. Исследование физико-механических свойств углепластика на основе эпоксидного связующего / Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: Электронный сборник статей по материалам ХСV студенческой международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд. ООО «СибАК», 2020. – № 11(94)/6. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://sibac.info/archive/technic/11%2894%29.pdf>

13. Зверевич Ю.К., Ацапина С.А., Дьякова Ю.Г., Хлаинг Зо У, Костромина Н.В. Применение поливинилформальэтилаля и поливинилбутирала для регулирования свойств эпоксидного олигомера / Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: Электронный сборник статей по материалам ХСV студенческой международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд. ООО «СибАК», 2020. – № 11(94)/6. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://sibac.info/archive/technic/11%2894%29.pdf>