

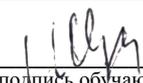
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Школа / филиал	Инженерная школа новых производственных технологий
Обеспечивающее подразделение	Отделение материаловедения
Направление подготовки / специальность	22.03.01 Материаловедение и технологии материалов
Образовательная программа (направленность (профиль))	Материаловедение в машиностроении

**ОТЧЕТ
ПО УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

Тема	Определение механических свойств полимерных композиционных материалов
------	-----------------------------------------------------------------------

Выполнил обучающийся	Школдина Ангелина Алексеевна
Группа	4Б71



(подпись обучающегося)

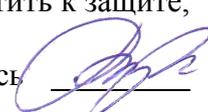
Дата сдачи работы « 05 » июня 2020г.

Проверил науч. руководитель: к.т.н., доцент ОМ М.В. Бурков
(Степень, звание, должность) (Ф.И.О.)

Дата проверки 05 июня 2020г.

Баллы (из 40) 40 баллов

Допустить/не допустить к защите,

Подпись 

Отчет принял Старший преподаватель ОМ И.Э. Васильева
(Степень, звание, должность) (Ф.И.О.)

Дата защиты 07 июня 2021 г.

Баллы (из 60) 57 баллов

Подпись 

Итоговое решение: **зачет**/незачет, итоговые баллы (из 100) 97 баллов

Томск 2021

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ООП
 О.Ю. Ваулина
« 1 » февраля 2021 г.

**ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ
на учебно-исследовательскую работу**

Тема учебно-исследовательской работы:

Исследование механических характеристик полимерных композиционных материалов

Перечень работ (заданий), подлежащих выполнению:

1. Изучить литературу по теме полимеров и композиционных материалов на их основе и их механических свойств
2. Провести обработку результатов механических испытаний на растяжение
3. Построить поля деформаций при помощи метода корреляции цифровых изображений (DIC)
4. Провести анализ поверхностей излома с использованием растровой электронной микроскопии
5. Проанализировать влияние используемых наполнителей на механические свойства полиимида и механизмы разрушения

Перечень отчетных материалов и требования к их оформлению:

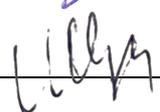
1. Отчет по учебно-исследовательской работе, выполненный с соблюдением ГОСТ и правил оформления НИ ТПУ.

Научный руководитель

к.т.н., доцент ТПУ

 _____ М.В. Бурков

Задание принял к исполнению

 _____ А.А. Школдина

« 1 » 02 2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Литературный обзор	5
1.1 Полимеры и композиционные материалы.....	5
1.2 Композиты на основе полимерной матрицы.....	7
1.3 Механические свойства полимеров и полимерных композитных материалов	9
2 Материалы и методы исследования	11
2.1 Изготовление образцов	11
2.2 Методики механических испытаний и оборудование	15
2.3 Результаты механических испытаний	16
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	22
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	23

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что развитие технологий напрямую зависит от достижений в области материаловедения. Любая конструкция будет бесполезной, если не будет материала, обладающего необходимыми свойствами, способного выдерживать эксплуатационные нагрузки. Вне зависимости от области, окончательное ограничение развития технологий определяется материалами. Композитные материалы в этом отношении представляют собой не что иное, как гигантский шаг в постоянно ведущемся стремлении к оптимизации материалов.

Строение композитов позволяет материалу сочетать различные, иногда даже противоречивые, свойства его составляющих. Многообразие композитных материалов обусловлено наличием множества вариаций составов композитов, а также различных методов их получения. Одним из вариантов является дисперсно-армированные композиты на основе полимера. Полимер, служащий матрицей в композитном материале, обычно является пластической массой, например, полиимидом.

Материал, о котором пойдет речь в данной работе представляет собой полиимид, наполненный углеродными волокнами и порошком флуоралита. Его состав и технология получения были разработаны с целью улучшения трибологических свойств ненаполненного полиимида. Но так как этот материал должен быть конструкционным, то важно, при повышении трибологических свойств, изменение механических характеристик сделать минимальным. В частности, введение в полиимид флуоралита в качестве твердой смазки существенно повышает его трибологические свойства, однако, при этом сильно портится структура материала и снижается предел прочности, что критически сказывается на эксплуатационных характеристиках такого полимера. Для преодоления снижения механических свойств в смесь полиимида с флуоралитом предложено добавить микроразмерные углеродные волокна, позволяющие повысить жесткость материала, предел текучести и предел прочности.

Предварительные исследования показали, что потенциальным составом с требуемой комбинацией свойств является следующее соотношение наполнителей: 80 мас.% полиимида (ПИ), 10 мас.% флуоралита (легкая фракция политетрафторэтилена – ПТФЭ) и 10 мас.% углеродных волокон (УВ).

Так как предлагаемый трехкомпонентный материал ранее не изучался, то целью данной работы является исследование механических характеристик полимерного композиционного материала (80%ПИ+10%ПТФЭ+10%УВ) и ненаполненного полиимида.

1 Литературный обзор

1.1 Полимеры и композиционные материалы

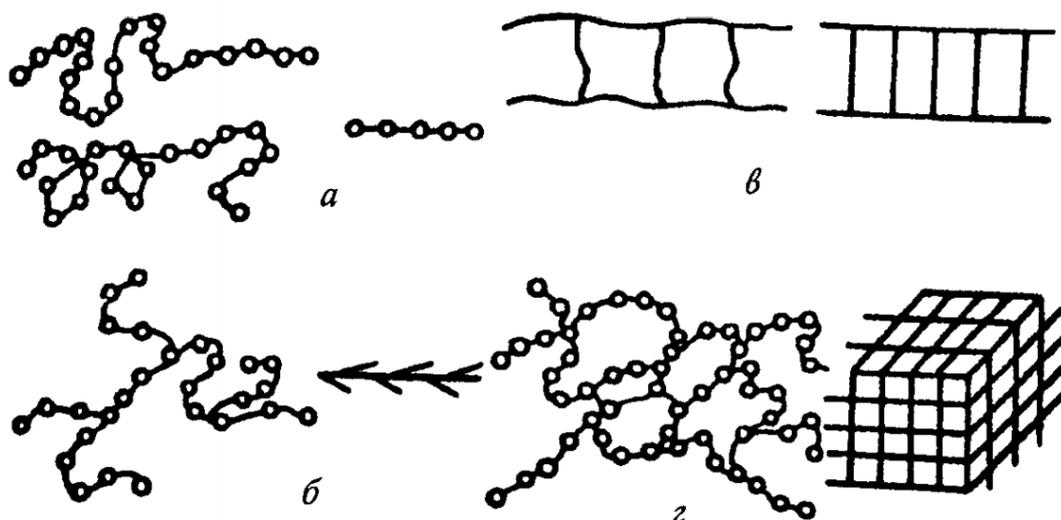
Существует множество определений полимеров, но в целом суть одна и та же: полимеры представляют собой высокомолекулярные соединения, построенные путем повторения атомных групп, соединенных химическими связями в макромолекулы [1]. Атомные группы, образующие полимеры, являются низкомолекулярными соединениями и называются мономерами.

Процесс синтеза полимеров называют полимеризацией. Степень полимеризации определяется количеством мономеров в цепи высокомолекулярного соединения.

Полимеры могут быть получены либо при поликонденсации, либо за счет процесса полиприсоединения. Под поликонденсацией понимают ступенчатую реакцию, в ходе которой происходит возникновение химической связи между множеством мономеров (как одинаковых, так и двух различных групп мономеров) и при этом образуются побочные продукты, такие как аммиак, вода, хлороводород и др. При полиприсоединении, в отличие от поликонденсации, не возникает побочных продуктов, так как ступенчатая реакция полиприсоединения протекает за счет множественного взаимодействия иономеров с мономерами, обладающими двойными связями или активными циклами, то есть происходит разрыв химических связей в молекулах мономеров и к ним присоединяются иомеры [2].

Существуют различные классификации полимеров, но среди них можно выделить основные: по происхождению (природные и синтетические), по составу (органические, неорганические, элементоорганические), по типу структуры и по отношению к нагреву [3].

Полимеры могут иметь четыре типа структур: линейную, линейно-разветвленную, лестничную и пространственную сетчатую (рисунок 1) [2].



а) линейная, б) линейно-разветвленная, в) лестничная, г) пространственная сетчатая

Рисунок 1 – Различные типы структур полимеров

Если полимеры имеют линейную структуру, то они выглядят как длинные, закрученные в спираль или зигзагообразные, цепочки. Цепочки состоят из многократно повторяющейся структурной группы (звена цепи). Такое строение обеспечивает эластичность материала. Полимеры с линейно-разветвленной структурой состоят из основной цепи (как линейные) и имеют боковые ответвления. В молекуле полимера с лестничной структурой две цепочки соединены химическими связями. Так как в некоторых случаях при соединении макромолекул между собой возникают прочные химические связи в поперечном направлении, то образуются полимеры с пространственной структурой. Они имеют сетчатую структуру с различной плотностью сетки или пространственную сетчатую структуру.

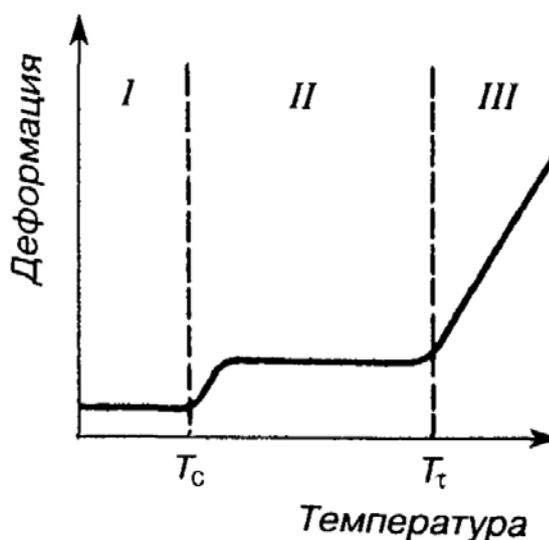
По отношению к нагреву полимеры делят на термопластичные и термореактивные. Термопластичные полимеры при нагреве размягчаются и плавятся, а при охлаждении затвердевают. Процесс плавления полностью обратим, так как не происходит химических превращений. Структура их молекул линейная или линейно-разветвленная. Термореактивные полимеры – полимеры, изначально имеющие линейную структуру, при нагреве размягчаются, далее, протекают химические реакции, в ходе которых полимеры приобретают пространственную структуру и превращаются в твердое вещество. Процесс нагрева в данном случае необратим [2].

Отличительной особенностью полимеров от других материалов являются их специфические свойства. Они в значительной мере зависят от фазового состояния, в

котором находится полимер (кристаллическое или аморфное) и от деформационного физического состояния (стеклообразное, высокоэластичное и вязкотекучее).

Для оценки фазового состояния используется понятие степени кристалличности. Степень кристалличности показывает соотношение количества кристаллической фазы к общему количеству фаз: и аморфной, и кристаллической [3].

В отличие от металлов, механические свойства полимеров сильнее зависят от температуры. Характеристикой полимеров, отражающей эту зависимость, является деформируемость (рисунок 2) [2].



T_c и T_t – температуры соответственно стеклования и начала вязкого течения, I, II, III – участки соответственно стеклообразованного, высокоэластичного и вязкотекучего состояний

Рисунок 2 – Термомеханическая кривая аморфного полимера с линейной структурой

Как видно из графика, при повышении температуры деформируемость растет, что стоит учитывать при оценке технологических и эксплуатационных свойств.

1.2 Композиты на основе полимерной матрицы

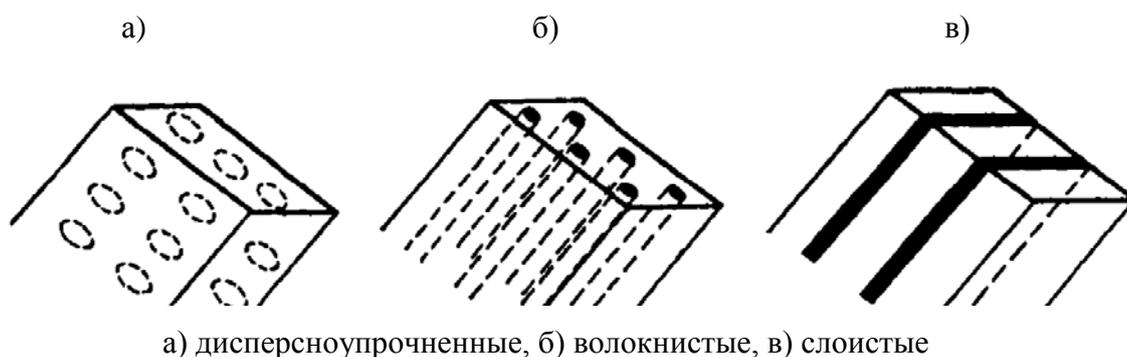
Полимеры могут быть представлены в виде волокон, пленок, лаков и т.д. Свойства полимеров в зависимости от их вида могут кардинально различаться. Эта особенность способствует широкому применению полимеров при создании композитных материалов.

Применение композитных материалов особенно актуально в случаях, когда требования к материалу противоречивы, так как композитные материалы представляют собой объемную систему, которая включает два (или более) различных компонента,

которые сильно отличаются по своим свойствам, но при этом структура этой системы позволяет использовать достоинства каждой составляющей. Компоненты данной системы должны быть нерастворимы друг в друге [2].

Необходимые эксплуатационные и механические свойства композитного материала достигаются за счет подбора материала матрицы и типа, размера, ориентации наполнителя и их соотношения. Матричный материал более пластичен, чем наполнители, потому что он является основой, которая обеспечивает цельность материала, передачу напряжений на арматуру и распределение напряжений по объему композита [4]. В зависимости от материала основы бывают композиционные материалы с металлической, с полимерной или с керамической матрицей.

Обеспечение различных характеристик материала (например, повышение твердости или прочности) происходит за счет добавления в материал матрицы наполнителя. По типу упрочняющего наполнителя различают дисперсноупрочненные, волокнистые и слоистые композиционные материалы [2] (рисунок 3).



а) дисперсноупрочненные, б) волокнистые, в) слоистые

Рисунок 3 – Схема строения композиционных материалов

При дисперсном упрочнении в материале матрицы равномерно распределяют мелкодисперсные частицы, которые в дальнейшем препятствуют распространению дислокаций при внешней нагрузке. В волокнистых композитных материалах свойства определяются как видом арматуры (нити, ленты, сетки различного плетения), так и ее расположением – арматура может быть расположена по одноосной, двухосной и трехосной схеме [2]. Структура слоистых композитных материалов состоит из чередующихся между собой слоев матричного материала и наполнителя.

Как уже отмечалось ранее, от типа наполнителя и его расположения в матрице зависят свойства композитного материала, а точнее его изотропность. Самой высокой изотропностью обладают дисперсноармированные композитные материалы, наиболее анизотропны волокнистые с одноосной схемой армирования. Также слоистые и волокнистые материалы могут быть квазиизотропными, так как они анизотропны в

микрообъеме, но изотропны по всему объему за счет расположения армирующих элементов [5].

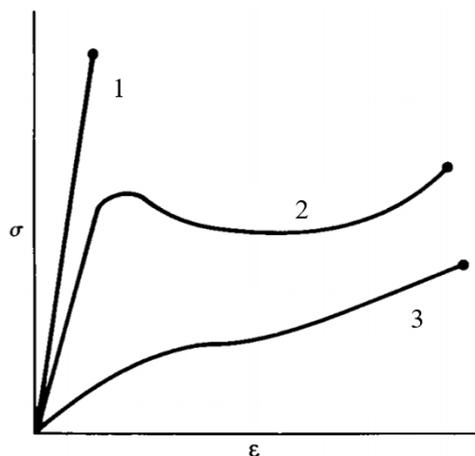
Композиты, в которых матрицей служит полимерный материал, являются одним из самых многочисленных и разнообразных видов материалов. Полимеры для матрицы могут быть в виде порошков, гранул, листов, пленок или в виде связующих. Под связующими подразумевается двух- или многокомпонентная система, в состав которой входит сам полимер и различные добавки (отвердители, катализаторы и т.д.) [5]. В качестве полимерной матрицы обычно используют различные пластические массы: эпоксидные и полиэфирные смолы, полиамиды, полиимиды, фторопласты и т.п. [1].

1.3 Механические свойства полимеров и полимерных композитных материалов

Для корректного проектирования и конструирования изделий из любого материала необходимо понимание различных аспектов его поведения. Одним из основных аспектов поведения материала являются его механические свойства. Механические свойства представляют собой совокупность параметров, которые характеризуют сопротивление материала внешнему силовому воздействию. Они описываются при помощи прочностных, упругих, вязкоупругих, деформационных свойств и твердости [1]. Чаще всего рассматривают предел прочности материала в Па (напряжение макроскопического разрушения образца), деформация при разрушении в %, модуль упругости в Па, условный предел текучести в Па и др.

Механические свойства композитного материала в первую очередь определяются свойствами самой матрицы. Если рассматривать композитный материал с полимерной матрицей, то большое влияние на механические свойства оказывают строение и размеры молекул полимера, надмолекулярная структура полимера, вид и химическая природа армирующей составляющей, межфазные явления и адгезия на границах раздела полимер-наполнитель и т.д. Механические характеристики самого полимера также определяются и такими внешними факторами как температура, давление, с какой скоростью и частотой происходит нагружение и т.п. [2]

Стоит рассмотреть три вида кривых напряжение-деформация для различных полимеров, представленных на рисунке 4 [6].



1 – хрупкий пластик, 2 – жесткий пластик, 3 - эластомер

Рисунок 4 – Кривые зависимости деформации от напряжения для трех видов полимеров

Модуль Юнга, он же модуль упругости, для хрупких пластиков часто приближен к $3 \cdot 10^9$ Па. Модуль Юнга эластомера меньше, чем у жесткого пластика, модуль Юнга которого меньше, чем у хрупкого пластика [6]. Модуль Юнга возрастает при армировании полимеров. Он свидетельствует о жесткости материала.

Для понимания поведения композитного материала проводятся различные виды испытаний, в том числе испытания на статическое и усталостное нагружение, в ходе которых проводится исследование зависимости напряжения от деформации образца. В зависимости от способа приложения нагрузки испытания на статическое нагружение разделяют на статическое растяжение, статическое сжатие, изгиб и кручение. Композитные материалы при статическом нагружении могут вести себя как хрупкие материалы, как пластические материалы и как материалы со сложной текучестью [7].

Одним из распространённых вариантов повышения таких механических характеристик как прочность, износостойкость и модуль упругости полимерных композитных материалов является дисперсное упрочнение.

2 Материалы и методы исследования

2.1 Изготовление образцов

В данном случае, с целью получения необходимых свойств материала, необходимо использовать смесь различных порошков. Смешение позволяет снизить композиционную неоднородность системы [5].

Значение плотности воды близко к значению плотности полимера, поэтому полимер плохо тонет в воде. В связи с этим смешивание производится в спирте, так как плотность полимера больше плотности спирта. К тому же использование спирта обеспечивает хорошее смачивание, за счет низкого поверхностного натяжения. Также перемешивание в спирте предотвращает распыление легких частичек полимера и наполнителя в воздухе. Многоэтапность смешивания позволяет достичь равномерного распределения частиц в объеме.

Для изготовления смеси массой 80 г состава 80 мас.% ПИ, 10 мас.% ПТФЭ и 10 мас.%УВ_{отож} необходимо:

1. Полиимид марки 1600 – 64 г
2. Политетрафторэтилен или низкомолекулярный фторопласт (флуралит) – 8 г
3. Углеродные волокна, отожженные (при 500 °С 30 мин. на воздухе - для удаления аппрета) - 8 г

Технология подготовки стандартной смеси из полиимида представлена ниже. Сначала рассмотрим процесс подготовки флуралита. Все дальнейшие операции производятся с флуралитом, находящимся в спирте. Первый шаг – механическое перемешивание магнитным смесителем ИКА С-MAG HS 4 в течение 30 мин. Затем производится ультразвуковое флуралита в спирте в течение 6 минут. Далее для перемешивания использовался турбосмеситель ИКА T18 digital ULTRA TURRAX в течение одной минуты при 12 200 об/мин, потом 15 секунд с увеличением частоты вращения до 14 000 об/мин. В результате такого перемешивания на поверхности за счет наличия легкой фракции флуралита образуется слой белой пены (рисунок 5).



Рисунок 5 – Внешний вид флуралита после перемешивания турбосмесителем

Флуралит был добавлен в полиимид и тщательно перемешан, полученная смесь была помещена в ультразвуковую ванну ПСБ-Галс на 5 минут. Затем турбосмесителем перемешиваем ту же смесь при 13 000 об/мин на протяжении 1 минуты и 15 секунд при 14400 об/мин.

Подготовка углеродных волокон производилась следующим образом: ультразвуковое перемешивание 3 раза по 2 мин, смешивание полиимида и флуралита с углеродными волокнами сначала вручную, а затем при помощи лопастного смесителя в течение 30 мин (из них 15 мин при 500 об/мин и остальное время при 750 об/мин).

Полученная смесь выливается в поддон и ставится в сушильный шкаф СШ-20 для просушивания (рисунок 6). Режим сушки: при 85 °С на 30 минут для того, чтобы испарился спирт, и до 125 °С на 3 часа для полного высыхания).



Рисунок 6 – Процесс сушки полученной смеси

В результате сушки была получена смесь, состоящая из 80 мас.% ПИ, 10 мас.% ПТФЭ и 10% УВ_{отож} (рисунок 7 а), которая в дальнейшем была дополнительно перемешана при помощи измельчителя Gemlux (рисунок 7 б).

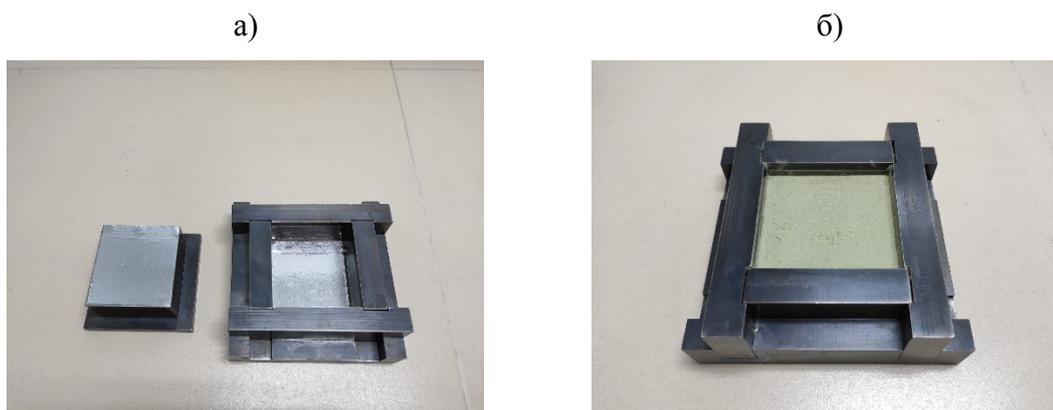


а) сразу после сушки, б) после измельчения

Рисунок 7 – Смесь полиимида с флуоралитом и углеродными волокнами

Для спекания образца из чистого полиимида порошок был изготовлен следующий образом: полиимид размешивали в спирте при помощи турбосмесителя, далее он просушивался и был измельчен в блендере Gemlux.

После всех ранее описанных стадий порошок засыпается в пресс-форму, представленную на рисунке 8 а, и вручную компактируется (рисунок 8 б) с целью удаления излишек воздуха, что приводит к увеличению насыпной плотности порошка.



а) пустая, б) наполненная полученным порошком

Рисунок 8 – Пресс-форма

Следующим шагом является спекание образца методом горячего прессования (рисунок 9). Для чистого полиимида и для наполненного параметры горячего прессования одинаковы.

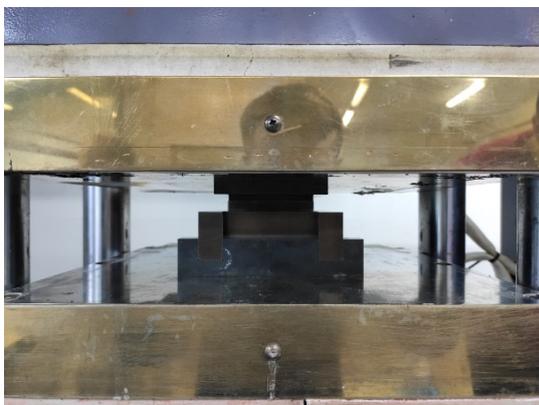


Рисунок 9 – Процесс горячего прессования

Горячее прессование состоит из нескольких этапов: компактирование под давлением пресса, нагрев, второе компактирование в несколько этапов с релаксацией, охлаждение под давлением и без давления, затем медленное охлаждение на воздухе. Медленное охлаждение позволяет структуре правильно сформироваться – без образования трещин и возникновения остаточных внутренних напряжений.

Компактирование под давлением пресса происходит при 20 °С в три этапа: давление 4 т (10 МПа), 8 т (20 МПа) и 18 (40 МПа). Нагрев до 300 °С происходит в течение 60-70 мин. При нагреве до 310 °С происходит второе компактирование под давлением 4 т с релаксацией (4 раза), выдержка 30 мин., поджим при давлении 4 т с релаксацией (3 раза). Охлаждение происходило под давлением 7 т (15 МПа) со скоростью 2 °С/мин. до 150 °С. Далее производилось медленное охлаждение на воздухе.

В итоге была получена заготовка в форме параллелепипеда с размерами 60×70 мм и толщиной 10 мм, из которого в дальнейшем будут изготавливаться все образцы для исследования (рисунок 10).

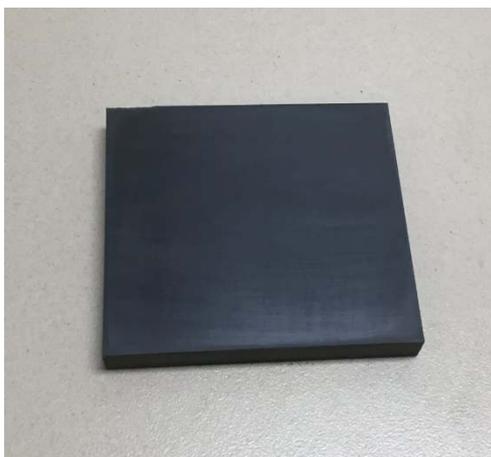


Рисунок 10 – Полученная заготовка, из которой будут вырезаться образцы для испытаний

2.2 Методики механических испытаний и оборудование

Методика испытания на статическое растяжение

1. Все образцы имели одинаковые габаритные размеры, толщину (2,7 мм) и форму (рисунки 11 и 12).



Рисунок 11 – Внешний вид образца

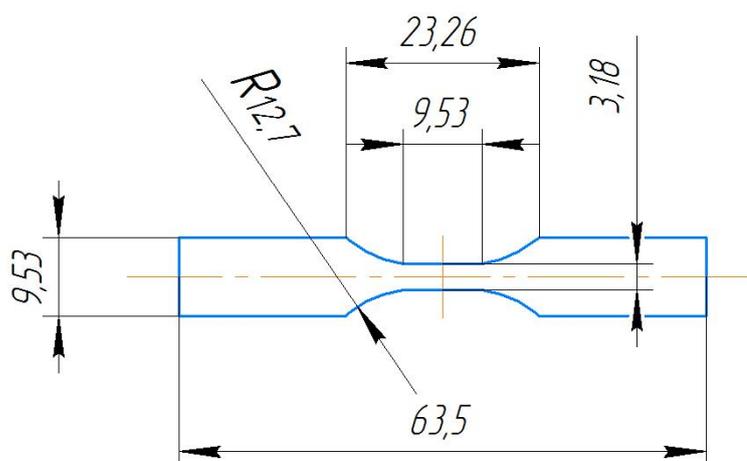


Рисунок 12– Чертеж образца

Испытания на статическое растяжение производились в соответствии со стандартом ASTM D638-14 (Standard test method for tensile properties of plastics).

2. Оборудование, используемое в данном испытании: сервогидравлическая испытательная машина BISS Nano 15 kN, фотоаппарат Canon 750D с объективом Canon EF 70-300mm f/4-5.6L, светодиодный осветитель Jinbei EF-100 LED Sun Light мощностью 100 Вт.

3. Параметры испытания представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры испытания на статическое растяжение

Параметр	Значение
Скорость нагружения	1 мм/мин
Частота фотографирования	1 раз в 5 сек
Частота записи данных с датчика испытательной машины (датчик нагрузки, датчик перемещения подвижного захвата)	5 Гц

Для фотофиксации поверхности образцов на поверхность при помощи краски из баллончика был нанесен спекл, который представлял собой белый фон с черными точками (рисунок 11). Фотофиксация осуществлялась для проведения анализа методом корреляции цифровых изображений (DIC – Digital Image Correlation). Суть DIC метода заключается в отслеживании перемещения поверхности образца в процессе испытаний, в данном случае, на статическое растяжение.

2.3 Результаты механических испытаний

Используя метод корреляции цифровых изображений были получены данные об удлинении при разрыве образцов из ненаполненного и наполненного полиимида. Результаты измерений при испытании на статическое растяжение образцов представлены на рисунке 13.

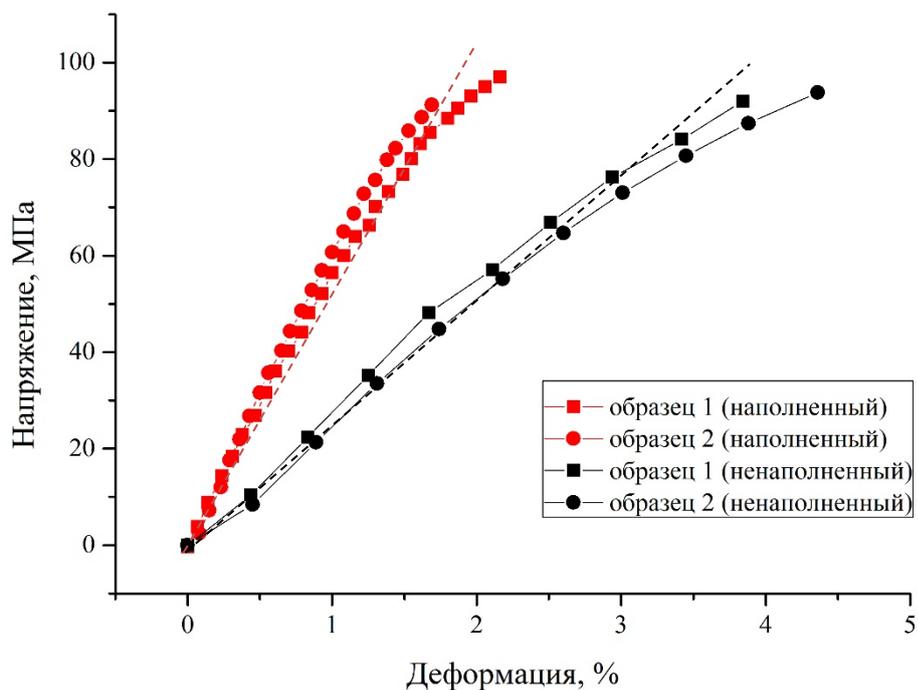


Рисунок 13 – График зависимости напряжения от деформации для образцов из ненаполненного и наполненного (80%ПИ+10%ПТФЭ+10%УВ_{отож}) полиимида при испытании на статическое растяжение

Стоит отметить, что модуль упругости наполненного полиимида больше модуля упругости ненаполненного, так как модуль упругости прямо пропорционален углу наклона линии, характеризующей зависимость напряжения от деформации. Из вышеприведенного графика видно, что тангенс угла наклона линии для ненаполненного полиимида меньше, чем для наполненного, то есть образец из наполненного полиимида обладает более высокой жесткостью.

Были рассчитаны значения модуля упругости и предела текучести для ненаполненного и наполненного полиимида. Модуль упругости равен тангенсу угла наклона линейного участка графика зависимости напряжения от деформации (в данном случае был рассмотрен участок от 0,5 до 1 % деформации) относительно оси абсцисс. Условный предел текучести был найден как значение функции в точке пересечения графика зависимости напряжения от деформации с линией, пересекающей ось абсцисс при значении $\epsilon = 0,1\%$ и имеющей такой же угол наклона, как и линейный участок, на котором рассчитывался модуль упругости (рисунок 14).

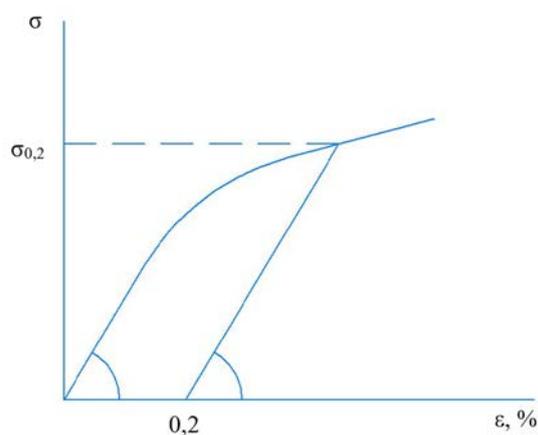


Рисунок 14 – Иллюстрация метода нахождения условного предела текучести

Для удобства сравнения характеристик полученные данные были сведены в таблицу 2.

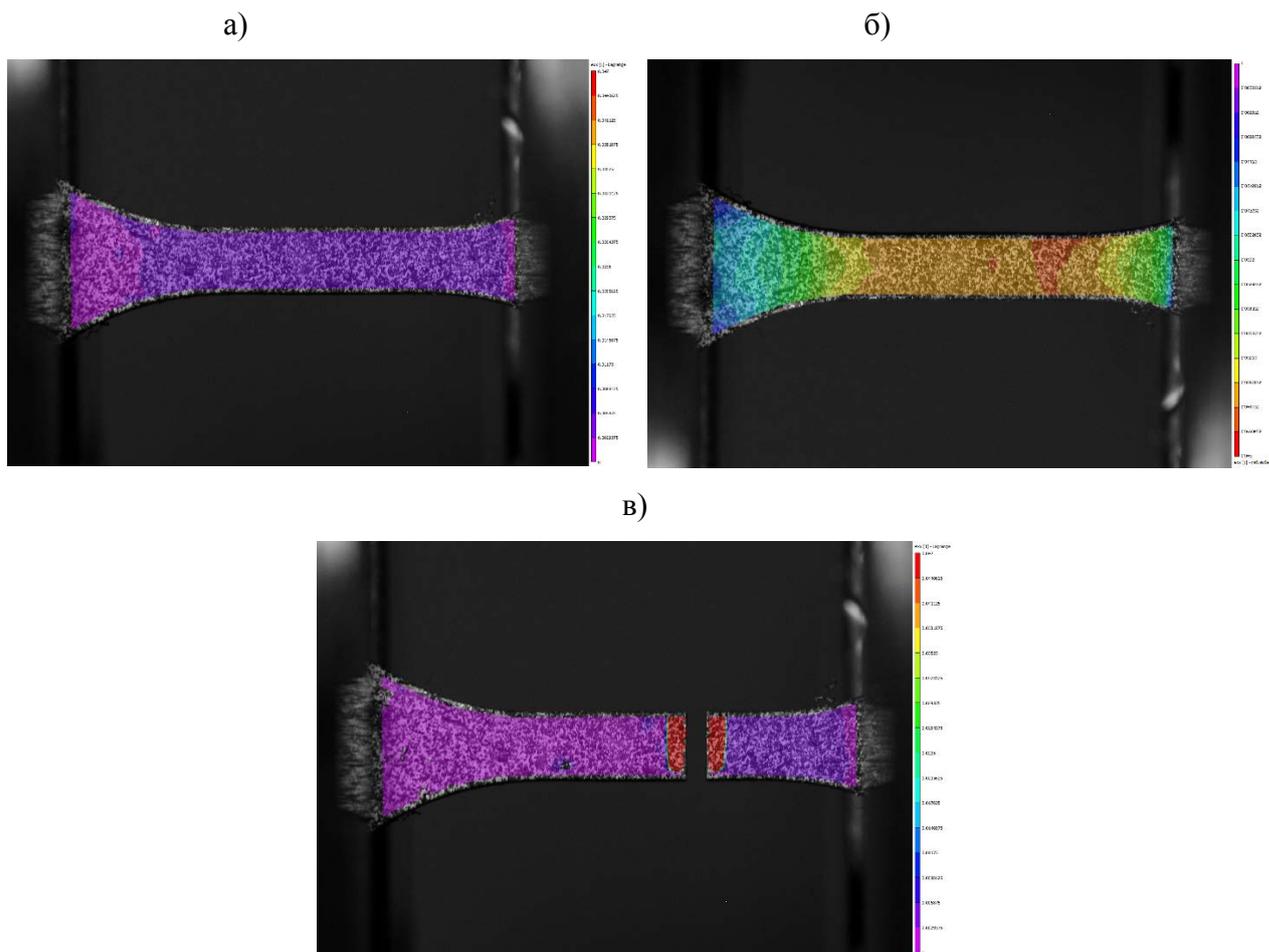
Таблица 2– Характеристики ненаполненного и наполненного полиимида

Характеристики	Ненаполненный полиимид	Наполненный (80%ПИ+10%ПТФЭ+10%УВ _{отож}) полиимид
Средний предел прочности, МПа	98,51±9,80	94,14±4,11
Среднее удлинение при разрыве, %	4,81±1,25	1,93±0,33
Среднее значение модуля упругости, ГПа	2,99±0,1	5,665±0,213
Средний условный предел текучести при $\epsilon_{0,1}=0,1\%$, МПа	29,42±11,55	84,78±9,57

Опираясь на данные, представленные в таблице 2, можно сделать вывод, что предел прочности полиимида, после наполнения флуоралитом и углеродными волокнами, уменьшился незначительно – на 4,4 % (4,37 МПа). Но при этом удлинение при разрыве уменьшилось в 2,5 раза.

Значение модуля упругости для дисперсно-упрочненного полиимида в 1,9 раз больше значения модуля упругости для ненаполненного полиимида, что свидетельствует о возрастании жесткости материала при добавлении отожженных углеродных волокон в полимерную матрицу. При этом условный предел текучести при деформации равной 0,1% у наполненного полиимида примерно в 2,9 раз больше, чем у ненаполненного.

Также, при помощи метода корреляции цифровых изображений, были получены фотографии, иллюстрирующие изменение поля деформаций в процессе статического растяжения образца (рисунок 15).

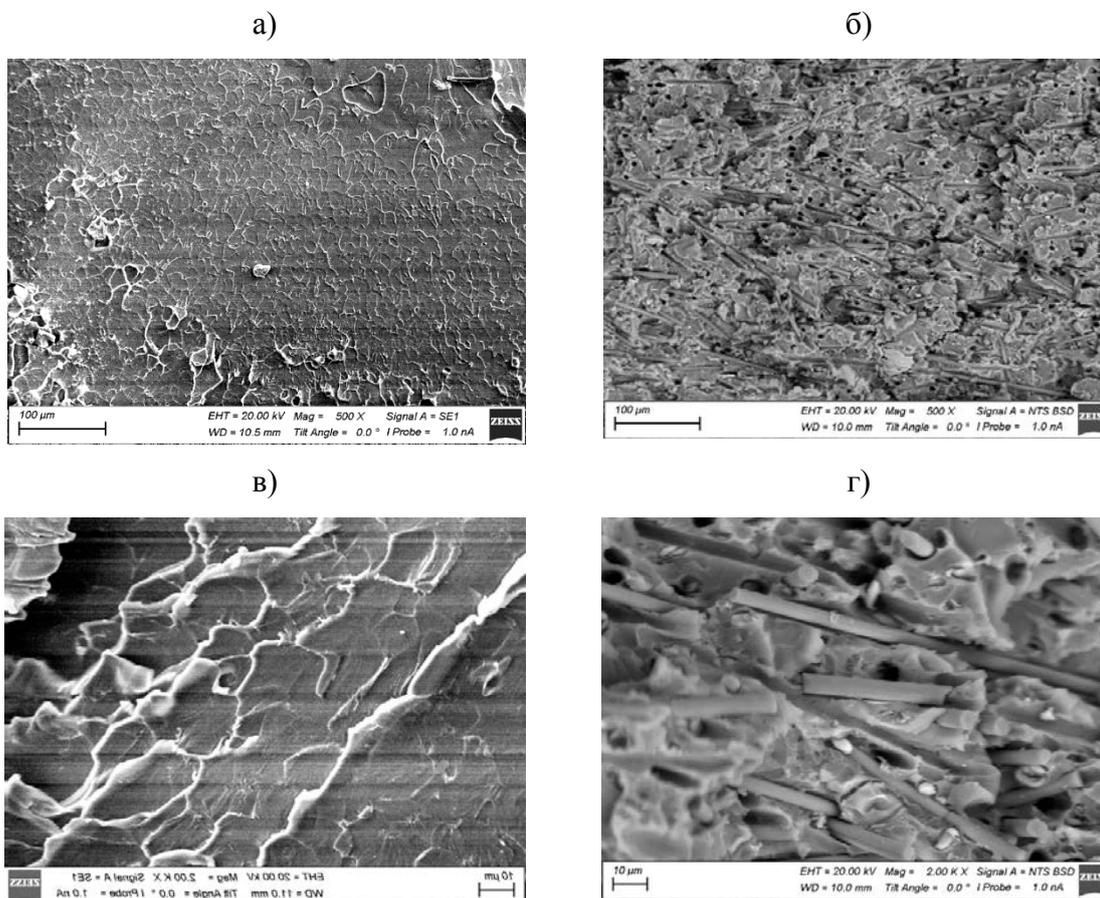


а) в начале статического растяжения, б) перед разрушением, в) после разрушения
 Рисунок 15 – Изображения, полученные методом DIC, для образца 1 из ненаполненного полиимида

Как видно из приведенных выше изображений разрушение произошло в месте локализации пластической деформации (обозначено красным цветом). Локализация пластической деформации может быть вызвана наличием различных дефектов в объеме материала. Как видно из представленных изображений в материале не наблюдается существенной локализации пластических деформаций с образованием шейки или существенной вытяжки образца до десятков или сотен процентов, как, например, в полиэтилене. Такое механическое поведение связано с молекулярной структурой полиимида. Он состоит из мономеров, включающих в себя имидные циклы, которые приводят к снижению подвижности молекул, повышая термическую стойкость полимера, а также снижая возможности для пластической деформации.

Для исследования вида разрушения были сделаны фотографии поверхности излома образца из ненаполненного (рисунок 16, а и в) и наполненного полиимида (рисунок 16, б и

г). Снимки были выполнены при помощи растрового электронного микроскопа с увеличением в 500 раз и в 2000 раз. На снимках отчетливо видно однородность материала образца из ненаполненного полиимида и армирующие частицы у наполненного полиимида: продолговатые цилиндрические включения – углеродные волокна, небольшие белые вкрапления – частицы флуоралита.



а) ненаполненного полиимида при увеличении в 500 раз; б) наполненного полиимида при увеличении в 500 раз; в) ненаполненного полиимида при увеличении в 2000 раз; г) наполненного полиимида при увеличении в 2000 раз

Рисунок 16 – Изображение поверхности излома

С учетом снимков, полученных при помощи растрового электронного микроскопа, можно сделать вывод, что значение среднего удлинения при разрыве для чистого полиимида выше, так как материал более однороден в объеме, что позволяет перестраиваться надмолекулярным структурам, что происходит в меньшем количестве в наполненном полиимиде из-за наличия в нем различных преград в виде включений наполнителей, а также присутствие межфазных границ и др.

Как видно из рисунка 16 (г), разрушение в дисперсно-упрочненном композитном материале может происходить по межфазным границам – волокно достаточно свободно «вытягивается» из полиимидной матрицы, что определяется невысокой адгезией между полимерной матрицей и армирующим наполнителем. Частицы флуоралита также обладают химической инертностью и низкой адгезией к полиимиду, поэтому выступают лишь в роли твердой смазки, снижая механические свойства. Тем не менее, присутствие углеродных волокон даже с такой невысокой адгезией позволяет повысить механические свойства итогового материала по сравнению с комбинацией полиимид + флуоралит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы была изучена литература и написан литературный обзор о полимерах, их свойствах и особенностях, композитных материалах на их основе. Также в рамках данной работы были изготовлены образцы из чистого и наполненного полиимида по технологии приведенной выше. Используя полученные образцы, были проведены механические испытания на статическое растяжение и получены данные о среднем пределе прочности, среднем удлинении при разрыве, рассчитаны модули упругости и условные пределы текучести как для образцов из чистого, так и наполненного полиимида. На основе данных, полученных в ходе испытаний, были построены графики зависимости напряжения от деформации для обоих материалов. Также были получены базовые навыки работы в программе Vic-2D для обработки цифровых изображений методом DIC и произведен анализ поверхности разрушения по снимкам, полученным при помощи растрового электронного микроскопа.

По результатам исследований механических свойств можно сделать вывод, что предел прочности наполненного полиимида (состав в мас.% - 80%ПИ+10%ПТФЭ+10%УВ_{отож}) снизился на 4,4 % (с 98,51 до 94,14 МПа), при этом удлинение при разрыве уменьшилось в 2,5 раза (с 4,81 до 1,93%). Но при этом модуль упругости увеличился в 1,9 раз, то есть повысилась жесткость материала. Условный предел текучести также возрос: у наполненного полиимида он в 2,9 раз больше, чем у чистого.

Дальнейшая работа по проведению механических испытаний полиимида предполагает испытания на циклическое растяжение (усталость), так как результаты таких испытаний помогают более точно оценить эксплуатационные характеристики материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Химия и физика полимеров. Краткий словарь : учебное пособие / М. С. Аржаков. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – ISBN 978-5-8114-4047-4. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/130153> (дата обращения: 07.01.2021)
2. Материаловедение: Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. / Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2007. – 784 с.:ил. ISBN5-93808-131-9
3. Свойства полимерных материалов : учебное пособие / Н. А. Адаменко, Г. В. Агафонова. – Волгоград : ВолгГТУ, 2018. — ISBN 978-5-9948-2951-6. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/157178> (дата обращения: 07.01.2021)
4. Общие сведения о полимерах. Учебно-методическое пособие / сост. С.А. Лескова. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т., 2017.-82 с.
5. Полимерные композиционные материалы (часть 1) : учебное пособие / Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.
6. Introduction to physical polymer science / Sperling, L. H. - Hoboken, New Jersey, 2006. – 845 с.
7. Механика разрушения композиционных материалов: Пер. с японск. / Фудзии Т., Дзако М. – М.: Мир, 1982. – 232 с.