

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему «Физико-механические характеристики новых композиционных материалов на  
основе полиуретанового связующего»

выполнена Данченко Алёной Юрьевной  
фамилия, имя, отчество студента в творительном падеже

по направлению подготовки/  
специальности 27.03.01 Стандартизация и метрология  
код наименование направления подготовки/ специальности

направленности Метрология, стандартизация, сертификация  
наименование направления подготовки/ специальности  
наименование направленности

Научный руководитель: профессор, д.т.н., с.н.с., Академик Метрологической Академии  
РФ, Сулаберидзе В.Ш.

Студент группы № M661  26.05.2020 А.Ю. Данченко  
подпись, дата инициалы, фамилия

Санкт-Петербург – 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ .....	4
НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ .....	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	6
ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 Общие сведения о материалах с полиуретановым связующим.....	9
1.1 Анализ актуальности исследования материалов на основе полиуретанового связующего .....	9
1.1.1 Общие сведения о полимерах .....	9
1.1.2 Синтетические полимеры.....	12
1.1.3 Материал на основе полиуретанового связующего .....	16
1.1.4 Описание объекта исследований .....	21
1.1.5 Применение композиционных материалов на основе полиуретанового связующего .....	23
1.1.6 Определение показателей (эластичности) прочности и упругости .....	24
1.1.7 Измерения с помощью МЕГЕОН-03000.....	25
1.2 Анализ требований к испытаниям на прочность и упругость композиционных материалов.....	27
1.2.1 Характеристики материалов .....	27
1.2.2 Подготовка к проведению исследований .....	28
1.3 Оборудование для проведения испытаний.....	34
1.4 Основные положения методики испытаний.....	35
Выводы по первому разделу .....	37
2 Разработка методики испытаний прочностных характеристик композиционных материалов.....	38
2.1 Область применения .....	39
2.2 Описание объекта исследования .....	40
2.3 Определяемые параметры .....	41
2.4 Условия исследований.....	42
2.5 Подготовка к исследованиям .....	43
2.6 Обработка данных и оформление результатов исследований .....	45
2.6.1 Обработка результатов измерений, выполненных на испытательном стенде МЕГЕОН-03000.....	45

2.7 Требования безопасности при исследованиях .....	47
Выводы по второму разделу .....	48
3 Результаты измерений .....	49
3.1 Результаты измерений при испытаниях на сжатие. ....	49
3.2 Результаты вычислений модуля Юнга и коэффициента упругости при испытаниях на сжатие.....	57
3.3 Графики функций, построенные по посчитанным значениям при испытаниях на сжатие.....	58
3.4 Результаты измерений образцов при испытаниях на разрыв .....	61
3.4 Результаты вычислений прочности, относительного удлинения и коэффициента упругости при испытаниях на разрыв.....	65
3.5 Графики функций, построенные по посчитанным значениям при испытаниях на разрыв.....	66
Вывод по третьему разделу.....	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	70
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	71
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	73
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	74

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа объемом 87 страниц содержит 39 рисунков, 12 таблиц и 2 приложения. Количество использованных источников – 9.

Ключевые слова: композиционный материал, полиуретановое связующее, прочность при разрыве, модуль Юнга, коэффициент упругости.

Объектом исследования являются композиционные материалы на основе полиуретанового связующего с различными мелкодисперсными наполнителями.

Цель работы – исследование прочностных характеристик композиций на основе полиуретана с минеральными наполнителями.

## **НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

ГОСТ 19.301-79 Программа и методика испытаний. Требования к содержанию и оформлению.

ГОСТ 33693-2015 (ISO 20753:2008) Пластмассы. Образцы для испытания.

ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) Пластмассы. Метод испытания на растяжение.

ГОСТ 9550-81 Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе.

ГОСТ 24888-81 Пластмассы, полимеры и синтетические смолы. Химические наименования, термины и определения.

## **ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**

ГОСТ – межгосударственный стандарт;

ГОСТ Р – национальный стандарт;

КД – конструкторская документация;

НТД – нормативно-техническая документация;

НД – нормативная документация.

## ВВЕДЕНИЕ

Потребности развивающейся техники стимулируют разработки новых материалов, обладающих свойствами, необходимыми для конкретных применений. Композиционные материалы на основе полимерных связующих с мелкодисперсными минеральными наполнителями являются перспективными, функциональными и конструкционными материалами в различных областях применения.

Композиционные материалы совмещают в себе свойства разных материалов. Независимо от происхождения, все материалы являются результатом объемного сочетания разнородных компонентов. Выбор материала матрицы (связующее) и дисперсного наполнителя определяется предполагаемым применением материала и, следовательно, требуемыми для планируемого применения свойствами: теплопроводность, электропроводность, диэлектрические характеристики, прочность, эластичность и др.

Композиционные материалы, которые существуют в настоящее время можно разделить на три основных класса, которые отличаются по их микроструктуре – это дисперсно-упрочненные, упрочненные частицами и армированные волокном [1]. В выпускной квалификационной работе были подробно рассмотрены материалы, упрочненные дисперсными наполнителями.

Одним из распространенных материалов, применяемых в качестве связующего, является полиуретан.

Полиуретан – это пластичный материал, который существует в разных формах и применяется во многих отраслях, которые выпускают товары, используемые в нашей повседневной жизни. Например, для изоляции зданий и техники, покрытия, клея, подошвы для обуви, спортивной одежды и деталей автомобилей. В связи с этим возрастает роль проведения испытаний на прочность и упругость, а также рассмотрения различного соотношения наполнителей и влияние данного фактора на исследуемые характеристики

материала. Видов синтетических материалов на основе полиуретана очень много и их свойства могут существенно различаться. Наиболее важные характеристики полиуретана – это прочность, упругость, термопластичность, а также материал обладает высокой степенью гидрофобности. Полиуретан может выдерживать высокие или резкие перепады температуры.

Целью дипломной работы является исследование прочностных характеристик композиций на основе полиуретана с минеральными наполнителями.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ методов исследования механических характеристик пластичных материалов;
- разработать методику испытаний характеристик эластичности и прочности образцов композиционных материалов: прочность на разрыв, модуль упругости;
- обосновать форму и размеры образцов для испытаний с учетом характеристик применяемого оборудования и требований НД;
- провести исследования характеристик композиций, с различным содержанием наполнителя.

Первый раздел работы посвящен анализу актуальности исследований композиционных материалов на основе полиуретанового связующего с мелкодисперсными наполнителями; выбору исследуемых характеристик и анализу требований нормативно-технической документации для проведения исследований. Проведена оценка пригодности оборудования, сформулированы основные положения методики испытаний.

Второй раздел содержит разработку методики испытаний прочностных характеристик композиционных материалов.

Третий раздел включает в себя результаты исследований композиционных материалов и их анализ.



## **1 Общие сведения о материалах с полиуретановым связующим**

### **1.1 Анализ актуальности исследования материалов на основе полиуретанового связующего**

#### **1.1.1 Общие сведения о полимерах**

В производствах легкой промышленности полимеры – не новый материал. Современные полимерные материалы, применяемые в легкой промышленности, включают в себя натуральные, полученные путем модификации из разнообразного природного сырья и синтетические полимеры, полученные посредством синтеза синтетического волокна.

Полимер – вещество, характеризующееся многократным повторением одного или более составных звеньев, соединенных между собой в количестве, достаточном для проявления комплекса свойств, который остается практически неизменным при добавлении или удалении одного или нескольких составных звеньев [2].

Полимерные материалы – композиции определённого состава, получаемые из мономеров, олигомеров, полимеров с введением (во время их изготовления, либо в процессе формирования изделия), различных компонентов (ингредиентов) для целенаправленного придания свойств, как материалу, так и изделию из него. Пластические массы, которые служат сырьем для получения полимерных материалов, состоят из смеси нескольких компонентов: связующего вещества (полимера) – для пластичности смеси в нагретом состоянии и твердости в охлажденном (синтетические смолы, каучуки, целлюлоза); наполнителя – удешевляет, для обеспечения трещиностойкости, теплостойкости, твердости (тонкомолотый асбест, песок, отходы резины); пластификатора – для увеличения эластичности; отвердителя – для ускорения набора прочности; пигмента - придает цвет.

##### **1.1.1.1 Классификация полимеров**

Полимеры классифицируются по происхождению и по структуре мономерной цепи.

- По происхождению:

По происхождению полимеры могут быть разделены на три типа: природные, синтетические и полусинтетические полимеры.

Натуральные полимеры встречаются в природе, растениях и животных. Например: белки, крахмал, целлюлоза и каучук. Так же сюда относятся биоразлагаемые полимеры, которые называют биополимеры.

Полусинтетические полимеры. Получают из природных полимеров и подвергаются дальнейшей химической модификации. Например: нитрат целлюлозы, ацетат целлюлозы.

Синтетические полимеры – это искусственные полимеры. Пластик является наиболее распространенным и широко используемым синтетическим полимером. Например: нейлон-6, полиэфир и т.д.

По структуре мономерной цепи полимеры делятся на:

- Линейные полимеры. Они имеют структуру, содержащую длинные и прямые цепи. К таким материалам относится ПВХ (поливинилхлорид). Полимер широко используется для изготовления труб.

- Полимеры с разветвленной цепью. Если линейные цепи полимера образуют разветвления, то такие полимеры классифицируются как полимеры с разветвленной цепью. Например: полиэтилен низкой плотности.

- Сшитые полимеры. Состоят из бифункциональных и трифункциональных мономеров. Они имеют более прочную ковалентную связь по сравнению с другими полимерами. Бакелит и меламин являются примерами в этой категории.

Другие способы классификации полимеров:

- Классификация на основе полимеризации:

- Полимеризация с добавлением: полиэтилен, тефлон, поливинилхлорид (ПВХ).

- Конденсационная полимеризация: нейлон-6, перилен, полиэфир.

- Классификация на основе мономеров

– Гомомер – в этом типе присутствует единичный тип мономерной единицы. Например, полиэтилен

– Гетерополимер или сополимер – состоит из разных типов мономерных звеньев. Например, нейлон-6.

• Классификация на основе молекулярных сил:

– Эластомеры – это резиноподобные твердые вещества, в которых присутствуют слабые силы взаимодействия. Например: резина.

– Волокна – прочные материалы, обладающие высокими силами взаимодействия. Например, нейлон-6.

– Термопласты – имеют промежуточные силы притяжения. Например: поливинилхлорид.

– Термореактивные полимеры – эти полимеры значительно улучшают механические свойства материала. Обеспечивает повышенную химическую и термостойкость. Например: фенольные смолы, эпоксидные смолы и силиконы.

### **1.1.1.2 Применение полимеров**

Биополимеры на основе крахмала могут быть использованы для создания обычной пластмассы путем экструдирования и литья под давлением.

Биополимеры на основе целлюлозы, такие как целлофан, используются в качестве упаковочного материала.

Эти химические соединения могут быть использованы для изготовления тонких упаковочных пленок, пищевых лотков и пеллет для отправки хрупких товаров при транспортировке.

Полусинтетические материалы, например нитрит целлюлозы, используется для создания лаков, для типографских красок и кожаных отделок.

Синтетические полимеры используются в строительстве, текстиле, для создания изоляционных материалов, в клеях и латексных красках.

## **1.1.2 Синтетические полимеры**

### **1.1.2.1 Классификация синтетических полимеров**

Синтетические полимеры — это искусственные химические вещества, синтезированные обычно из производных нефтепродуктов. В отличие от природных и модифицированных природных полимеров, синтетические «конструируют» из относительно малых молекул. Возможности создания новых химических соединений практически не ограничены. Вещества с заданными свойствами могут создаваться для применения почти в любых условиях. В зависимости от размера молекул и химического состава полимеры могут выполнять самые разнообразные функции.

Синтетические полимеры имеют в своей основе низкомолекулярные органические соединения (мономеры), которые в результате реакций полимеризации или поликонденсации образуют длинные цепочки. Расположение и конфигурация молекулярных цепей, тип их связи во многом определяют механические характеристики материала [2].

Синтетические полимеры можно разделить на четыре основные категории: термопласты, термореактивные материалы, эластомеры и синтетические волокна.

Термопластичный или термопласт пластик, представляет собой пластиковый полимерный материал, который становится пластичным или формуемым при определенной повышенной температуре и затвердевает при охлаждении.

Большинство термопластов имеют высокую молекулярную массу. Полимерные цепи связываются межмолекулярными силами, которые быстро ослабевают при повышении температуры, образуя вязкую жидкость. В этом состоянии термопласты могут быть изменены и обычно используются для изготовления деталей с помощью различных технологий переработки полимеров, таких как литье под давлением, компрессионное формование, каландрирование и экструзия.

К термопластам относятся:

- акрил;
- ABS;
- нейлон;
- PLA;
- полибензимидазол;
- поликарбонат;
- полиэфирсульфон;
- полиоксиметилен;
- полиэфирэфир кетон;
- полиэфиримид;
- полиэтилен;
- полифениленоксид;
- полифениленсульфид;
- полипропилен;
- полистирол;
- поливинилхлорид;
- поливинилиденфторид.

Термореактивный материал представляет собой материал, который при нагревании укрепляется, но не может быть подвергнут повторной формовке или нагреву после первоначального формования. Термореактивные продукты могут выдерживать высокую температуру без потери своей структурной целостности.

К термореактивным полимерам относятся:

- полиуретаны;
- вулканизированная резина;
- бакелит;
- duroпласт;
- меламиновая смола;
- диаллилфталат;

- эпоксидная смола;
- сложные эфиры;
- силиконовые смолы;
- тиолит.

Эластомером называют полимер с вязкими и эластичными свойствами. Молекулы эластомеров удерживаются вместе слабыми межмолекулярными силами, как правило, они демонстрируют низкий модуль Юнга и высокий предел текучести или высокую деформацию разрушения.

Примеры эластомеров:

- натуральный полиизопрен;
- синтетический полиизопрен;
- полибутадиен;
- хлоропреновый каучук;
- бутилкаучук;
- галогенированные бутилкаучуки;
- стирол-бутадиеновый каучук;
- нитриловый каучук;
- гидрированные нитрильные каучуки;
- эпихлоргидриновый каучук;
- полиакриловая резина;
- силиконовая резина;
- фторсиликоновая резина;
- фторэластомеры;
- перфторэластомеры;
- полиэфирные блок-амиды;
- хлорсульфонированный полиэтилен;
- этиленвинилацетат.

Синтетические волокна представляют собой искусственный материал, который чаще всего получают из сырья нефти, угля или природного газа. В

зависимости от типа волокна эти химические вещества объединяются с кислотами и спиртом, иногда нагреваются, а затем экструдированы.

К синтетическим волокнам относятся:

- вискоза;
- нейлон;
- полиэстер.

Особенностью синтетических полимеров является высокая эластичность и упругость – способность противостоять деформациям и восстанавливать первоначальную форму. Также наличие длинных молекулярных цепочек в структуре синтетических материалов обуславливает низкую хрупкость пластиковых изделий.

### **1.1.2.2 Свойства синтетических полимеров**

Синтетические полимеры могут сочетать в себе несколько свойств за счет добавления в матрицу различных видов мелкодисперсных наполнителей, что делает такие материалы еще более усовершенствованными и пригодными для многих видов деятельности. Основные свойства, характерные таким материалам:

- *эластичность (упругость)* – способность деформированного тела возвращаться к своей первоначальной форме и размеру, когда силы, вызвавшие деформацию, больше не действуют;
- *прочность* – свойство материала противостоять разрушению под воздействием внешних сил. Прочные материалы способны выполнять свои предназначения, не разрушаясь и сохраняя свою форму в течение заданного времени;
- *сопротивление коррозии (коррозионная стойкость)* – это способность металла противостоять химическому разрушению, которое могло бы возникнуть при воздействии на материал окружающей среды;
- *водостойкость* – способность материала сохранять свою прочность при насыщении водой;

- *термостойкость* – способность материала не разрушаться под действием напряжения, вызванным изменением температуры.

Отмечая положительные стороны и качества синтетических полимеров, нельзя забывать и про отрицательные стороны материала:

- Сложность утилизации. Вторичное использование материала допускается только в случае правильной сортировки. Смесь полимеров с разным химическим составом вторичной обработке не подлежит. В природе материалы из пластика разлагаются очень долго, иногда до сотен лет. Если материал сжигать, то некоторые виды пластмассы выделяют большое количество вредных высокотоксичных веществ в атмосферу.

- Слабая устойчивость к ультрафиолетовому излучению. Под действием ультрафиолетовых лучей разрушаются длинные полимерные цепочки, из-за чего увеличивается хрупкость изделий и понижается их прочность.

- Сложность или невозможность соединения отдельных типов синтетических материалов [3].

Полимеры нашли применение во всех областях деятельности и жизни человека. Синтетические полимеры используются в быту и в промышленности, как самостоятельные изделия, так и в соединении с ними для получения особых и неповторимых характеристик.

### **1.1.3 Материал на основе полиуретанового связующего**

#### **1.1.3.1 Общие сведения**

Среди композиционных материалов на основе полимерного связующего существуют и востребованы композиции на основе полиуретанов. Полиуретаны являются одним из самых универсальных пластиковых материалов. Природа химического состава позволяет адаптировать полиуретаны для решения сложных задач, формовать их в необычные формы и улучшать промышленные и потребительские товары, добавляя комфорт, тепло и удобство в нашу жизнь.



Полиуретан – один из самых универсальных синтетических материалов. Природа химического состава позволяет полиуретану быть приспособленным, чтобы разрешить многообещающие проблемы и улучшить промышленные и потребительские товары, добавляя комфорт и удобство в нашу жизнь.

Происхождение полиуретана относится к началу Второй мировой войны, когда он впервые был разработан в качестве замены резины. Универсальность этого нового органического полимера и его способность заменять дефицитные материалы подтолкнуло на применение материала в разных сферах. Во время Второй мировой войны полиуретановые покрытия использовались для пропитки бумаги и изготовления одежды, покрытия для самолетов и антикоррозийного покрытия для защиты металла и дерева.

Полиуретанами называются полимеры, имеющие в основной цепи макромолекулы уретановые группы  $-\text{NHCOO}-$  (их иногда называют еще амидоэфирными группами). На рисунке 1 представлена структурная формула полимера.

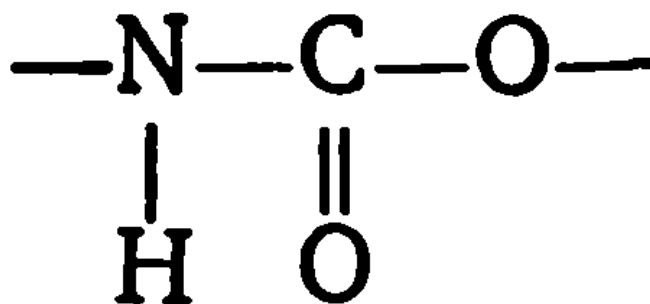


Рисунок 1 – Структурная формула полимера

Полиуретан может разрабатываться как конструкционный, так как этот материал очень прочный и твердый. Также из материала на основе полиуретанового связующего делают теплопроводные и диэлектрические покрытия.

Полиуретан можно выделить среди других полимеров, так как он является отличным объектом наблюдений зависимостей свойств материала

от его состава. Значимую роль в составе полиуретана играют пропорции наполнителей и других добавок. Наполнители могут в корне изменить свойства полиуретана, сделав его как более прочным и жестким, так и более эластичным и упругим. Данные качества и являются главными преимуществами полиуретана, в отличие от других полимеров.

За последнее время появилось много различных типов полиуретанов, значительно увеличилось количество фирм, производящих полиуретановые эластомеры или исходные материалы для этих систем. Типы полиуретанов можно разделить на следующие классы: линейные полиуретаны; литьевые полиуретаны; вальцуемые полиуретаны; термопластичные полиуретаны; ячеистые полиуретаны; напыляемые полиуретаны; полиуретановые поромеры; волокна спандекс.

**Линейные полиуретаны.** Первыми полиуретанами, выпускаемыми в промышленных масштабах, были полиуретаны марок игамид U, перлон U. Их получали посредством реакции полиприсоединения алифатических гликолей и алифатических диизоцианатов без поперечного сшивания цепей и без добавления трифункциональных соединений, вызывающих рост боковых цепей (разветвление цепи).

**Литьевые полиуретаны.** Литьевые полиуретаны первыми получили широкое распространение и даже сейчас составляют большую часть выпускаемых уретановых эластомеров. Примерами этих материалов являются вулколлан, адипрен, формрез и многие другие. Их можно подразделить на три основные группы: нестойкие полимеры, стойкие полимеры (нестойкие преполимеры обычно получают на основе сложных полиэфиров, стойкие – на основе простых полиэфиров) и системы, получаемые в одну стадию; химическая основа у них примерно одинакова, хотя технология получения различна.

Во всех случаях используют три основных компонента:

- 1) высокомолекулярный полиол – сложный или простой полиэфир с концевыми гидроксильными группами;

- 2) ароматический диизоцианат;
- 3) удлинитель цепи в виде низкомолекулярного гликоля, воды или диамина.

Литьевые материалы получают обычно при высоких температурах, хотя при соответствующем выборе ингредиентов одностадийный процесс может протекать и при комнатной температуре.

**Вальцуемые полиуретаны.** Вальцуемые полиуретаны получают при небольшом избытке диизоцианата, в результате чего происходит поперечное сшивание. При недостатке диизоцианата получается относительно стойкий несшитый полимер с гидроксильной группой на конце цепи. При определенном молекулярном весе продукт представляет собой мягкий каучук, который можно перерабатывать на вальцах подобно другим эластомерам. Для сшивки материала применяют диизоцианат, перекись или серу. При вальцевании можно также ввести наполнители, например, технический углерод; весь процесс, включая вулканизацию при высокой температуре и под давлением аналогичен процессу производства обычных резин.

Свойства конечного продукта сходны со свойствами литьевых полиуретанов, однако диапазон свойств ограничен. Эти материалы особенно пригодны в тех случаях, когда форма или размер изделия не позволяют изготовить его литьевым способом. Другое важное преимущество заключается в том, что их можно перерабатывать на обычном оборудовании для резин.

**Термопластичные полиуретаны.** Линейные полиуретаны, описанные выше, относятся к термопластичным материалам и обладают свойствами, сходными со свойствами других термопластов, например, нейлона. Современные термопластичные полиуретаны представляют собой эластомеры, но, тем не менее, их можно перерабатывать на оборудовании для обычных пластмасс. По химическому составу они очень похожи на литьевые полиуретаны, а для поперечной сшивки обычно используют избыток

диизоцианата. При использовании соответствующего диизоцианата, поперечные связи оказываются термолабильными, так, что при температурах переработки в машине для литья под давлением поперечные связи разрушаются (при  $\sim 160^{\circ}\text{C}$ ), и полимер становится линейным. Поперечные связи восстанавливаются после охлаждения изделия.

По свойствам термопластичные полиуретаны близки к литьевым материалам, но их основное преимущество в том, что из них можно экономично и в больших масштабах изготавливать малогабаритные изделия литьем под давлением, экструзией, шприцеванием и каландрованием на стандартном оборудовании для переработки пластмасс.

**Ячеистые полиуретаны.** Плотность большинства полиуретановых эластомеров  $1,10 - 1,30 \text{ г/см}^3$ . Плотность мягких пенополиуретанов, используемых для обивки (мебели и пр.), и жестких изоляционных пеноматериалов меняется от  $0,02$  до  $0,20 \text{ г/см}^3$ . Ячеистые полиуретановые эластомеры можно получать с плотностью  $0,35 - 0,65 \text{ г/см}^3$ . Такие ячеистые материалы следует скорее рассматривать как более эластичные и мягкие полиуретановые эластомеры; их практически нельзя сравнивать с обычными пенополиуретанами. При взаимодействии воды с изоцианатами выделяется двуокись углерода, и поэтому воду часто использовали в качестве вспенивающего агента (вспенивателя). Вместо воды можно применять агенты, выделяющие азот, или некоторые жидкости с низкой температурой кипения, которым иногда отдается предпочтение при изготовлении ячеистых структур.

**Напыляемые полиуретаны.** Ни литьевые, ни вальцуемые полиуретаны непригодны для нанесения покрытий на изделия сложной геометрической формы или с большой площадью поверхности. Необходимость решить эту проблему явилась стимулом для разработки напыляемых полиуретановых композиций (обычно на основе литьевых эластомеров, полученных одностадийным способом), которые наносятся на изделия при высокой температуре. Использование катализатора обеспечивает

быстрое отверждение покрытий толщиной до 12,5 мм. Напыляемые полиуретаны отличаются от обычных материалов для покрытий тем, что не содержат растворителя.

Термопластичные или вальцуемые материалы можно модифицировать, придав им более линейную структуру, в результате чего они могут растворяться в таких обычных растворителях, как метилэтилкетон, ацетон, этилацетат и т.д.

**Полиуретановые поромеры.** Поромеры имеют пористую полимерную структуру, например кофрам – материал, имитирующий кожу, на основе полиуретана с беспорядочно расположенными волокнами. Благодаря пористой структуре этот материал «дышит» как кожа. В настоящее время имеется несколько разновидностей такого материала.

**Волокна спандекс.** Эти волокна состоят из полимеров с длинной цепью, содержащих, по крайней мере, 85% полиуретановых сегментов. По сравнению с волокном натурального каучука спандекс прочнее и устойчивее к старению, что позволяет делать его более тонких.

Кроме того, можно получить волокна чистых белых оттенков, и они легче окрашиваются, чем волокна на основе обычных каучуков. Правда, они легче разрушаются под напряжением и обесцвечиваются в хлорных отбеливателях.

Технология получения полиуретанов весьма разнообразна и открывает широкие возможности для модифицирования молекулярной структуры материала в зависимости от его возможных новых областей применения, что является уникальным свойством полиуретановых эластомеров.

#### **1.1.4 Описание объекта исследований**

Объектом исследования являются полимерные композиционные материалы на основе полиуретанового связующего с различными мелкодисперсными наполнителями.

По влиянию на прочность полимеров, наполнители можно разделить на две группы: усилители, увеличивающие прочность полимерного материала, и

инертные наполнители. Многие наполнители применяют для придания материалу определенного свойства, например, термостойкости. Но в отдельных случаях наполнители являются обязательными компонентами композиции, без которых невозможно обеспечить необходимую прочность изделия. Введение наполнителей в композиционные материалы позволяет получать на выходе образцы с улучшенными свойствами.

Рассмотрим более подробно свойства мелкодисперсных наполнителей, на основе которых были получены исследуемые композитные материалы.

Наполнители:

- гидроксид алюминия  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (305);
- прокаль (104);
- кварц (Б);
- кристобалит.

Гидроксид алюминия  $\text{Al}(\text{OH})_3$  – мелкокристаллический порошок преимущественно белого цвета, с увеличением массового содержания которого, в образце с полиуретановым связующим, материал становится более прочным, но менее упругим. Также важным свойством гидроксида алюминия, как наполнителя, является то, что он делает материал более термостойким и увеличивает его огнезащитные свойства.

Прокаль – популярный тонкодисперсный пигмент, который используется в производстве лакокрасочных материалов, пластмассовых изделий, строительных составов и многого другого. Его применение позволяет повысить атмосферостойкость, а также обеспечить равномерное нанесение покрытий и оптимальную текучесть композиции. Этот универсальный наполнитель представляет собой мелкогранулированный порошок белого цвета без посторонних примесей. С увеличением процентного содержания данного наполнителя образец становится менее упругим.

Кварц или диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) бывает как минерального происхождения и производится из природных ископаемых (кварцит,

диатомит, новакулит, трепел), так и искусственного, когда его получают методом осаждения или пирогенетическим путём. В первом случае кварц имеет кристаллическую структуру, во втором – находится в аморфном состоянии. Обе модификации диоксида кремния применяются в качестве дисперсного наполнителя при производстве ПКМ и пластмасс. Они имеют различный химический состав, отличаются размерами и формой частиц, но, благодаря способности придавать полимерно-композиционным материалам специфические свойства, нашли широкую область применения.

Применение кварца марки Б как мелкодисперсного наполнителя позволяет придать материалу повышенные прочностные, высокие водохимические свойства и низкую теплопроводность.

Кристобалит получают путем кальцинирования обогащенного, особо чистого кварцевого песка при температуре свыше 1470 °С. Результатом данного преобразования является формирование полиморфной разновидности кварца с измененной кристаллической структурой. В отличие от обычной кварцевой муки, частицы кристобалита имеют более округлую форму частиц и уменьшенную удельную массу. С добавлением большего процентного содержания кристобалита увеличивается и прочность материала.

### **1.1.5 Применение композиционных материалов на основе полиуретанового связующего**

Полиуретановые эластомеры как конструкционный материал используются в самых различных областях. Стоимость готовых изделий из полиуретановых эластомеров составляет 15% общей стоимости изделий из полиуретана. Исходя из этого, можно утверждать, что полиуретаны с каждым годом находят все большее применение.

В производстве колес и шин используются в основном литые полиуретаны, причем наибольший объем потребления приходится на производство шин из-за крупных размеров. В общем машиностроении

используются и литые, и вальцуемые полиуретаны, а изделия из них различаются по размерам.

В автомобилестроении номенклатура изделий довольно разнообразна, но по весу они обычно не велики, так что общий тоннаж потребления полиуретанов здесь относительно невелик. Раньше эти изделия изготовлялись почти исключительно из вальцуемого полиуретана, теперь все больше используется термопластичный материал.

Корфам используется в технике для изготовления уплотнений для гидравлического и пневматического оборудования, однако, крупнейшая область применения корфам – обувная промышленность: он заменяет кожу для верха обуви.

Волокна спандекс уже широко используются для изготовления купальных костюмов, поясов и т.п.

### **1.1.6 Определение показателей (эластичности) прочности и упругости**

Испытания проводят на испытательной машине, отвечающей следующим требованиям:

а) имеет захваты для закрепления образцов:

- обеспечивающие надежное крепление образца для исключения проскальзывания и совпадение продольной оси образца с направлением растяжения;

- не оказывающие давления на зажатые концы образца, которое может вызвать деформирование образца или его разрушение или разрушение ячеистой структуры пластмассы.

б) обеспечивает постоянную скорость движения подвижного захвата с закрепленным образцом в направлении, параллельном продольной оси образца,  $(5 \pm 1)$  мм/мин;

в) обеспечивает измерение и регистрацию нагрузки, приложенной к образцу в пределах рабочего диапазона с погрешностью не более 1% измеряемой величины;



d) оснащена экстензометром для измерения изменения расчетной длины образца, обеспечивающим измерение с точностью до 0,1 мм.

Требования к испытаниям на разрыв [4].

Перед испытанием измеряют толщину и ширину образцов в трех местах: в середине и на расстоянии около 5 мм от меток. Вычисляют среднеарифметические значения полученных результатов, используя которые вычисляют начальное поперечное сечение образца.

Образцы закрепляют в зажимы испытательной машины по меткам, определяющим положение кромок зажимов таким образом, чтобы продольные оси зажимов и ось образца совпадали между собой и направлениям движения подвижного зажима. Зажимы равномерно затягивают, чтобы исключалось скольжение образца в процессе испытания, но при этом не происходило его разрушение в месте закрепления.

При испытании измеряют нагрузку и удлинение образца непрерывно или в момент достижения предела текучести, максимальной нагрузки, разрушения образца.

Требования к испытаниям на сжатие [5].

Измеряют диаметр образца и его высоту в центре с точностью  $\pm 0,01$  мм.

Образец устанавливают между пластин таким образом, чтобы исключить его проскальзывание относительно пластин. Не допускается выступание образца за края пластин.

Прикладывают к образцу предварительную нагрузку, в зависимости от особенностей испытательного режима оборудования.

Измеряют расстояние между пластинами с точностью  $\pm 0,01$  мм.

### **1.1.7 Измерения с помощью МЕГЕОН-03000**

Испытания материалов по определению прочностных характеристик проводятся на динамометрическом стенде.

МЕГЕОН-03000 – это испытательный стенд с ручным управлением, использующий прецизионный шариковый винт и линейно направленный

привод, имеющий закрытую прочную конструкцию, легок в эксплуатации. Тестовая поверхность может перемещаться в вертикальной и горизонтальной плоскостях, испытываемый предмет легко фиксируется.

Прибор имеет шкалу измерения дальности, а испытываемый предмет может быть зафиксирован.

Для испытаний необходимо установить динамометр на стенд и выбрать подходящий режим испытания. В зависимости от структуры и особенностей испытываемого предмета, положить его на тестовую поверхность или зажать. Если испытываемый предмет и поверхность не находятся на одной прямой линии, можно отрегулировать тестовую поверхность так, чтобы получилась одна линия. В процессе испытания динамометр точно фиксирует величину.

## **1.2 Анализ требований к испытаниям на прочность и упругость композиционных материалов.**

Испытания материалов по определению прочностных характеристик относятся к стандартным, и регламентированы требованиями стандартов или технических условий.

Методы определения таких механических свойств как разрыв и сжатие описаны в ГОСТ Р 58017-2017 «Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Сжатие» и в ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) «Пластмассы. Метод испытания на растяжение».

Испытания состоят в измерении прочности и упругости образцов на основе связующего из полиуретана с мелкодисперсными наполнителями.

### **1.2.1 Характеристики материалов**

ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002) «Пластмассы. Метод испытания на сжатие» устанавливает для этих материалов методы определения модуля упругости.

Модуль упругости,  $E_c$ , МПа определяется по формуле:

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \quad (1)$$

где  $\sigma_2$  – напряжение при сжатии, измеренное при значении относительной деформации  $\varepsilon_2 = 0,0025$  МПа

$\sigma_1$  – напряжение при сжатии, измеренное при значении относительной деформации  $\varepsilon_1 = 0,0005$  МПа

Расчеты модуля упругости были произведены по формуле ниже:

$$E_c = \frac{\Delta F \cdot L_0}{S \cdot \Delta \delta}, \quad (2)$$

где  $\Delta F$  – измеренная амплитуда динамической нагрузки, Н;

$L_0$  – длина образца, мм;

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

$\Delta \delta$  – изменение толщины образца, мм.

ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» устанавливает для этих материалов методы определения прочности при растяжении и коэффициента упругости.

Прочность при разрыве,  $\sigma_{pp}$ , Мпа, вычисляют по формуле:

$$\sigma_{pp} = \frac{F_{pp}}{A_0} \quad (3)$$

где  $F_{pp}$  – растягивающая нагрузка, при которой образец разрушился, Н;  
 $A_0$  – первоначальное поперечное сечение образца, мм<sup>2</sup>.

## 1.2.2 Подготовка к проведению исследований

### 1.2.2.1 Требования к образцам

В соответствии с п.6.1 и п.6.2 ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002) образцы для испытания должны иметь форму прямоугольной призмы, прямого цилиндра или прямой трубки.

Рекомендуемые размеры образцов для испытания приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Рекомендуемые размеры образцов

Тип образца	Измеряемый показатель	Длина $l$ , мм	Ширина $b$ , мм	Толщина $h$ , мм
А	Модуль упругости при сжатии	50±2	10,0±0,2	4,0±0,2
Б	Напряжение при сжатии	10,0±0,2		
Примечание - Допускается использовать образцы длиной (15,0±0,2) мм и (30±2) мм.				

Образец не должен быть изогнут. Поверхности и кромки образца не должны иметь вмятин, царапин, усадочных раковин, заусенцев и других видимых дефектов, способных повлиять на результат испытания. Поверхности образца, обращенные к опорным площадкам, должны быть параллельны и расположены под прямым углом к направлению действия нагрузки.

Образцы следует проверить на соответствие указанным требованиям путем визуального осмотра с помощью угольников и плоских плит, а также измерения микрометром. Образцы, визуально или после измерения не соответствующие требованиям, должны быть изъяты или обработаны до необходимых размеров и формы перед испытанием.

#### **1.2.2.2 Проведение кондиционирования**

Образцы для испытаний выдерживают в определенной атмосфере или при температуре кондиционирования в условиях достигнутого температурно-влажностного равновесия между образцом для испытаний и атмосферой или температурой кондиционирования[7].

Период кондиционирования следует устанавливать в нормативном или техническом документе на пластмассу.

Если в соответствующих стандартах на пластмассу не указан период кондиционирования, то следует принимать следующие условия:

- а) не менее 88 ч - для атмосфер 23/50 или 27/65;
- б) не менее 4 ч - для температур от 18 °С до 28 °С.

Образцы после кондиционирования подвергают испытаниям в той же стандартной атмосфере, при которой проводилось кондиционирование, если отсутствуют другие указания.

Во всех случаях испытание проводят сразу же после извлечения испытуемого образца из камеры кондиционирования.

Образцы для испытаний на разрыв должны быть изготовлены в соответствии с ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012)

Рекомендуется использовать образцы для испытания типов 1А и 1В, допускается использование образцов типа 2, форма и размеры которых приведены на рисунке 1 и в таблице 2.

Образец типа 1А изготавливают методом литья под давлением или методом прессования, образец типа 1В - механической обработкой.

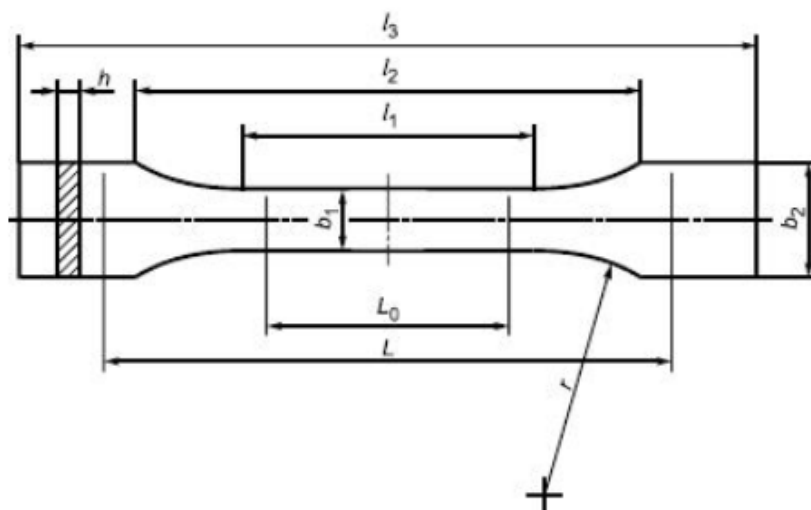


Рисунок 2 – Образцы типов 1А, 1В и 2

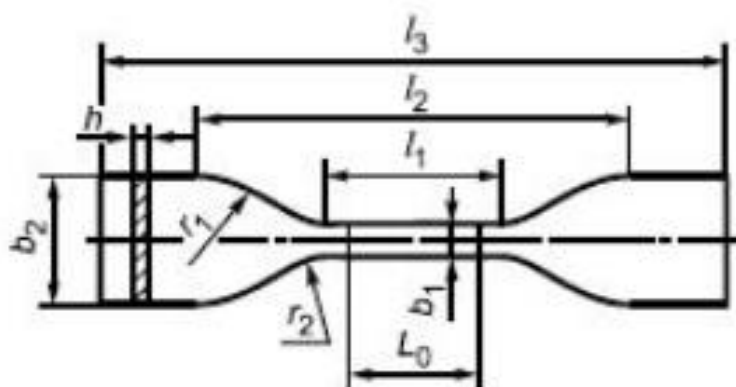


Рисунок 3 – Образец типа 1

Таблица 2 – Размеры образцов

Обозначение образца	A12, A22	A13, A23	A14, A24	A15, A25	A18, A28
Масштабный коэффициент	1:2	1:3, кроме толщины и $l_1$	1:4, кроме $l_3$	1:5, кроме толщины	1:8, кроме $l_3$
$l_3$ , мм	75	60	45	30	23,8
$l_2$ , мм	$58 \pm 2$	$35 \pm 1$	$27,5 \pm 1,0$	$23 \pm 2$	$13,8 \pm 0,5$
$l_1$ , мм	$30,0 \pm 0,5$	$24,0 \pm 0,5$	$20,0 \pm 0,5$	$12,0 \pm 0,5$	$10,0 \pm 0,5$
$b_1$ , мм	$5,0 \pm 0,5$	$3,5 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,1$	$2,0 \pm 0,2$	$1,25 \pm 0,05$

Продолжение таблицы 2

$b_2$ , мм	10,0±0,5	7,2±0,2	5,0±0,2	4,0±0,2	2,5±0,1
$r$ , мм	30	8,8	6,3±0,2	12	3,2±0,2
$h$ , мм	(2,0±0,1)	1 или (2,00±0,05)	1,0±0,1	(2,0±0,1)	0,5±0,1

При необходимости перед испытанием на образцы наносят метки в соответствии с рисунками 2-3 и таблицей 2. Метки не должны ухудшать качество образцов или вызывать разрушение образцов в местах меток.

Образцы должны иметь гладкую ровную поверхность, без вздутий, сколов, трещин, раковин и других видимых дефектов.

Для испытания изотропных материалов используют не менее пяти образцов, для испытания анизотропных материалов не менее пяти образцов, вырезанных в местах и направлениях, указанных в нормативном документе или технической документации на материал или согласованных между заинтересованными сторонами.

### 1.2.2.3 Требования к испытательному оборудованию

Требования к оборудованию при испытаниях на разрыв [4].

Испытательная машина, которая при растяжении образца обеспечивает измерение нагрузки с погрешностью не более 1% измеряемой величины и постоянную скорость раздвижения зажимов в пределах, требуемых настоящим стандартом.

Зажимы для закрепления образца должны быть присоединены к испытательной машине так, чтобы продольная ось образца совпадала с направлением растяжения.

Образец закрепляют так, чтобы предотвратить его скольжение относительно губок зажимов. Зажимы не должны вызывать преждевременное разрушение образца в местах крепления или проскальзывание образца в зажимах.

При определении модуля упругости при растяжении важно, чтобы скорость деформирования была постоянной и не изменялась, например, за счет движения губок зажимов. Это особенно важно при использовании клиновых зажимов.

Требования к оборудованию при испытаниях на сжатие [5].

Для приложения сжимающей нагрузки к испытываемому образцу используют опорные площадки с закаленными стальными полированными плоскими (отклонение от плоскостности в пределах 0,025 мм) поверхностями, параллельными друг другу и перпендикулярными к оси нагружения. Сжимающее устройство должно быть сконструировано таким образом, чтобы вертикальная ось образца совпадала с направлением действия нагрузки с точностью 1:1000.

Измеритель нагрузки должен обеспечивать измерение нагрузки при сжатии с погрешностью не более  $\pm 1\%$  измеряемого значения. Измеритель нагрузки должен быть практически безинерционным при выбранной скорости испытания.

#### **1.2.2.4 Проведение исследований**

Проведение исследований при испытаниях на сжатие [5].

Образец помещают между опорными площадками так, чтобы его центральная вертикальная ось совпадала с центральной осью поверхностей опорных площадок. Следует убедиться, что торцы образца параллельны поверхностям опорных площадок, а затем настроить испытательную машину так, чтобы поверхности торцов испытываемого образца касались опорных площадок.

В процессе сжатия поверхности торцов образца могут скользить по опорным площадкам в разной степени, в зависимости от структуры поверхности образца и опорных площадок. Это может привести к деформированию образца (бочкообразованию) различной степени, что в свою очередь может повлиять на измеряемые показатели. Этот эффект тем сильнее, чем мягче материал.



Для наиболее точных измерений рекомендуется обработать поверхность соответствующей смазкой для облегчения скольжения или использовать диски тонкой наждачной бумаги между поверхностями образца и опорных площадок, чтобы затормозить скольжение. Использование одного из этих методов следует отразить в протоколе испытаний.

Образец не должен быть существенно нагружен до начала испытания, однако предварительные нагрузки могут оказаться необходимыми, чтобы избежать искривленного участка в начале кривой "напряжение/относительная деформация".

Проведение исследований при испытаниях на разрыв [4].

Перед испытанием измеряют толщину и ширину образцов в трех местах: в середине и на расстоянии около 5 мм от меток. Вычисляют среднеарифметические значения полученных результатов, используя которые вычисляют начальное поперечное сечение образца.

Образцы закрепляют в зажимы испытательной машины по меткам, определяющим положение кромок зажимов таким образом, чтобы продольные оси зажимов и ось образца совпадали между собой и направлениям движения подвижного зажима. Зажимы равномерно затягивают, чтобы исключалось скольжение образца в процессе испытания, но при этом не происходило его разрушение в месте закрепления.

### 1.3 Оборудование для проведения испытаний

МЕГЕОН-03000 – это простой и удобный испытательный стенд с ручным управлением, использующий прецизионный шариковый винт и линейно направленный привод, имеющий закрытую прочную конструкцию, легок в эксплуатации (Рисунок 4). Тестовая поверхность может перемещаться в вертикальной и горизонтальной плоскостях, испытываемый предмет легко фиксируется.



Рисунок 4 – Испытательный стенд МЕГЕОН-03000

Максимальная нагрузка – 100 кг (1000 Н). Погрешность измерений не превышает 0,5%. Прибор может осуществлять, различные типы нагружений, такие как: растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг. Рабочая температура при испытаниях 5 – 35°C. Допустимая температура – 10 – +60°C. Относительная влажность – 15 – 80% [8].

#### **1.4 Основные положения методики испытаний**

Требования к содержанию и оформлению методики устанавливает ГОСТ 19.301-79 «Программа и методика испытаний. Требования к содержанию и оформлению».

Методика испытаний включает метод исследований, условия и средства исследований, отбор образцов, алгоритмы выполнения операций по определению одной или нескольких взаимосвязанных характеристик свойств объекта, формы представления данных и оценивания точности, достоверности результатов, требования техники безопасности и охраны окружающей среды.

Методика испытаний должна иметь титульный лист с наименованием ИЛ, наименованием методики и содержать описания:

- области применения;
- пригодности методики для специфического целевого использования;
- объекта исследований;
- определяемых параметров и количественных характеристик;
- условий исследований;
- испытательного оборудования и других средств испытаний, включая эталоны и стандартные образцы;
- порядка проведения исследований;
- обработки данных и оформления результатов исследований, включая оценку неопределенности результатов измерений (при необходимости);
- требований безопасности и охраны окружающей среды[9].

Основой для разработки методики являются рассмотренные ранее стандарты ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002) «Пластмассы. Метод испытания на сжатие устанавливает для этих материалов методы определения модуля упругости» и ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) «Пластмассы. Метод

испытания на растяжение». Разработанная методика будет приведена в следующем разделе.

## **Выводы по первому разделу**

Проведен анализ актуальности исследований композиционных материалов на основе полиуретанового связующего и мелкодисперсных наполнителей. В качестве исследуемых характеристик выбраны прочность и упругость.

Рассмотрены методы определения прочностных характеристик материалов.

Проанализированы требования нормативно-технической документации к методам, испытательному оборудованию и образцам для исследований синтетических материалов на основе полиуретанового связующего.

Установлено, что применяемое оборудование пригодно для проведения данного вида исследований и соответствует требованиям нормативно-технической документации.

Сформулированы основные положения методики испытаний.

## **2 Разработка методики испытаний прочностных характеристик композиционных материалов**

В соответствии с требованиями, установленными в первом разделе, необходимо разработать методику испытаний прочностных характеристик композиционных материалов.

Основным документом, определяющим процесс исследований, является оформленная методика испытаний.

Требования к содержанию и оформлению методики были рассмотрены в первом разделе. Титульный лист для разрабатываемой методики испытаний приведён в Приложении А.

## **2.1 Область применения**

Настоящая методика испытаний устанавливает порядок проведения исследований композитных материалов на основе полиуретанового связующего, а также определяет испытательное оборудование, применяемое в исследованиях, устанавливает требования к условиям проведения исследований и требования к безопасности при проведении исследований. Применяется в случае необходимости установления действительных значений прочности и упругости материала, с целью их подтверждения заявляемым производителем характеристикам.

## **2.2 Описание объекта исследования**

Для проведения исследований на сжатие необходим образец цилиндрической формы, подготовленный заранее в лаборатории. Поверхности образца не должны иметь вмятин, царапин и других видимых дефектов. Поверхности образца, которые направлены к опорным площадкам испытательного стенда, должны быть параллельны.

Для проведения исследований на разрыв нужен образец прямоугольной формы, толщиной не более 3-х миллиметров с большей шириной и толщиной на концах образца, для помещения его в зажимы испытательного стенда.



### **2.3 Определяемые параметры**

При измерении прибором МЕГЕОН-03000 определяются:

Параметры, определяемые при испытаниях на сжатие:

- сжимающая нагрузка на образец;
- длина, на которую изменяется образец под нагрузкой стенда.

Параметры, определяемые при испытаниях на разрыв:

- растягивающая нагрузка, при которой образец разрушается;
- удлинение, на которое растянулся образец до разрыва.

## **2.4 Условия исследований**

Испытания проводят при соблюдении следующих условий.

- температура окружающего воздуха от 10 до 35 °С;
- относительная влажность воздуха до (30–80)% при температуре 25 °С;
- атмосферное давление от 650 до 800 мм рт. ст.;
- напряжение питания (220±22) В;
- частота питания (50±0,5) Гц.

## 2.5 Подготовка к исследованиям

Подготовка к измерениям с помощью испытательного стенда МЕГЕОН-03000

### 1. Подготовка к работе.

Включить шнур питания в сеть 50 Гц, 220 В, включить прибор. При этом должен загореться экран. Показатели прибора должны быть установлены на нуле.

### 2. Подготовка к проведению измерений.

Устанавливаем в прибор зажимы (для испытаний на разрыв) или опорные диски (для испытаний на сжатие).

### 3. Подготовка образца.

При испытаниях на сжатие, каждый образец выравнивается с помощью наждачной бумаги и канцелярского ножа, чтобы поверхности цилиндра повторяли форму круга и, соприкасаясь с поверхностью пластин испытательного стенда, не было зазоров.

Для испытаний на разрыв были выбраны образцы формы типа 1, изображенной на рисунке 5. Образцы выравниваются под нужную форму с помощью ножниц, по бокам оставляются уплотненные концы, которые в дальнейшем будут помещены между зажимов.

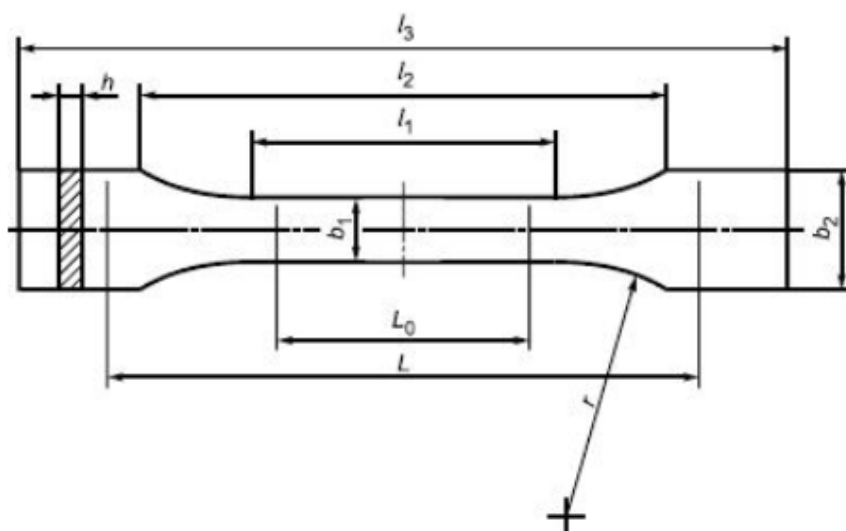


Рисунок 5 – Образцы типов 1А, 1В и 2

Порядок измерения нагрузки и деформации образца с помощью испытательного стенда МEGEON-03000:

1. измерить длину и толщину у образцов;
2. поместить образец между зажимов (или пластин), чтобы он полностью был зафиксирован;
3. выставить значения нагрузки и изменения деформации на ноль;
4. с помощью ручки сбоку стенда растягивать (или сжимать) образец до тех пор, пока это возможно, и фиксировать значения параметров по ходу работы;
5. измерить деформированный образец;
6. выключить испытательный стенд и вынуть шнур из розетки.

## 2.6 Обработка данных и оформление результатов исследований

### 2.6.1 Обработка результатов измерений, выполненных на испытательном стенде МEGEON-03000

1. Рассчитать диаметр образца как среднее арифметическое измерений в 4 точках:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^4 D_i}{4}, \quad (4)$$

2. Площадь поперечного сечения образца цилиндрической формы рассчитывается по формуле:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad (5)$$

где  $D$  – диаметр образца.

3. Модуль Юнга, при испытании на сжатие можно рассчитать по формуле:

$$E_c = \frac{\Delta F \cdot L_0}{S \cdot \Delta \delta}, \quad (6)$$

где  $\Delta F$  – измеренная амплитуда динамической нагрузки, Н;

$L_0$  – длина образца, мм;

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

$\Delta \delta$  – изменение толщины образца, мм.

4. Коэффициент Гука рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta \delta}, \quad (7)$$

где  $\Delta F$  – измеренная амплитуда динамической нагрузки, Н;

$\Delta \delta$  – изменение толщины образца, мм.

5. Рассчитать прочность при разрыве можно по формуле:

$$\sigma_{pp} = \frac{F_{pp}}{A_0}, \quad (8)$$

где  $F_{pp}$  – растягивающая нагрузка, при которой образец разрушился, Н;

$A_0$  – первоначальное поперечное сечение образца, мм<sup>2</sup>.

6. Относительное удлинение при разрыве рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{pp} = \frac{\Delta L}{L_0} 100, \quad (9)$$

где  $\Delta L$  – изменение длины образца в момент разрыва, мм;

$L_0$  – первоначальная длина образца, мм.

7. Коэффициент упругости Гука можно рассчитать по формуле:

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta L}, \quad (10)$$

где  $F_{pp}$  – растягивающая нагрузка, при которой образец разрушился, Н;

$\Delta L$  – изменение расчетной длины образца в момент разрыва, мм.

## **2.7 Требования безопасности при исследованиях**

Общие требования безопасности к конструкции машин должны соответствовать ГОСТ 12.2.003.

Общие требования безопасности к электрооборудованию машин в зависимости от конструкции должны соответствовать ГОСТ 12.2.007.0-75 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Изделия электротехнические. Общие требования безопасности». Согласно стандарту, общие требования перечислены ниже:

- в конструкции электротехнических изделий должны быть предусмотрены средства шумо- и виброзащиты, обеспечивающие уровни шума и вибрации на рабочих местах в соответствии с утвержденными санитарными нормами;

- изделия, которые создают электромагнитные поля, должны иметь защитные элементы (экраны, поглотители и т.п.) для ограничения воздействия этих полей в рабочей зоне до допустимых уровней;

- изделия, являющиеся источником теплового, оптического, рентгеновского излучения, а также ультразвука, должны быть оборудованы средствами для ограничения интенсивности этих излучений и ультразвука до допустимых значений;

- электрическая схема изделия должна исключать возможность его самопроизвольного включения и отключения;

- конструкция изделия должна исключать возможность неправильного присоединения его сочленяемых токоведущих частей при монтаже изделий у потребителя.

### **Выводы по второму разделу**

Во втором разделе рассмотрены общие требования к подготовке, проведению исследований и обработке полученных данных, которые учтены при разработке методик испытаний прочностных характеристик композиционных материалов.

Разработанная методика использована для дальнейших вычислений, которые приведены в третьем разделе.



### 3 Результаты измерений

#### 3.1 Результаты измерений при испытаниях на сжатие

Результаты измерений образцов с мелкодисперсными наполнителями при испытаниях на сжатие с помощью испытательного стенда МEGEON-03000 представлены в таблицах 3-6.

Таблица 3 – Результаты измерений образцов с наполнителем гидроксид алюминия при испытаниях на сжатие с помощью испытательного стенда МEGEON-03000.

	Образец №XVI		Образец №XVII		Образец №XVIII		Образец №XIX	
	Длина деформации образца, мм	Динамическая нагрузка, Н	Длина деформации образца, мм	Динамическая нагрузка, Н	Длина деформации образца, мм	Динамическая нагрузка, Н	Длина деформации образца, мм	Динамическая нагрузка, Н
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,21	65,8	0,04	5,5	0,3	63,9	0,34	41,5
3	0,31	84,9	0,11	14,5	0,57	99,4	0,53	58,7
4	0,43	114,5	0,21	30,1	0,79	132,4	0,84	102,1
5	0,56	144,5	0,34	55,3	0,91	148	1,05	131,1
6	0,69	178,4	0,52	87,3	1,02	166,9	1,28	160
7	0,8	203	0,64	111,6	1,12	184,9	1,41	175,1
8	0,95	236,5	0,8	141,8	1,22	198,5	1,47	180,8

Продолжение таблицы 3

9	1,07	267,9	0,92	165,8	1,33	219,2	1,59	201,2
10	1,23	304,3	1,06	191,9	1,43	233,6	1,75	219
11	1,37	342,1	1,27	242,4	1,53	247,9	1,91	238,7
12	1,53	386,5	1,41	270,8	1,6	259,2	2,04	249,3
13	1,75	457,4	1,54	302,9	1,7	278,7	2,14	259,4
14	1,89	499,2	1,76	357,5	1,83	301,9	2,26	274,4
15	2,03	539,9	1,81	449,2	2,02	340,8	2,35	276,9
16	2,26	607,7	2,27	488,9	2,15	360,6	2,45	288,1
17	2,42	647,4	2,6	579,2	2,28	383,3	2,58	301,7
18	2,55	697,6	2,83	638,8	2,46	417,4	2,72	315,5
19	2,75	764,6	3	686	2,57	432,7	2,84	326,2
20	2,98	842			2,69	446,7	3	344,9
21					2,79	473,4	3,18	361
22					2,93	495,5		
23					3,01	505,3		

Таблица 4 – Результаты измерений образцов с наполнителем прокаль при испытаниях на сжатие с помощью испытательного стенда МЕГЕОН-03000.

	Образец №XII		Образец №XIV		Образец №XV	
	Длина деформации образца, мм	Динамическая нагрузка, Н	Длина деформации образца, мм	Динамическая нагрузка, Н	Длина деформации образца, мм	Динамическая нагрузка, Н
1	0	0	0	0	0	0
2	0,22	51,7	0,26	50,9	0,19	33,9
3	0,4	110,3	0,47	82,1	0,3	54,4
4	0,52	150,9	0,64	110,7	0,5	95
5	0,69	234	0,97	157,7	0,64	115,5
6	0,82	269,8	1,21	190,3	0,84	158,7
7	0,94	319,1	1,45	223,2	1,03	195,8
8	1,06	364,2	1,63	245,7	1,19	220,8
9	1,21	428,3	1,89	288,8	1,34	246,4
10	1,35	507,2	2,02	302,9	1,49	278,5
11	1,56	599,9	2,28	337,9	1,66	313,9
12	1,75	682,5	2,45	362,3	1,85	354
13	1,91	741,8	2,63	387,6	1,99	380,3
14	2,12	826,7	2,84	419,7	2,16	420,3
15			3,02	445,4	2,27	442,6
16			3,18	472,8	2,38	463,8
17					2,55	496,2

Продолжение таблицы 4

18					2,71	533,4
19					2,88	575,4
20					3,01	598,7
21					3,15	637,2
22					3,33	688

Таблица 5 – Результаты измерений образцов с наполнителем кварц марки Б при испытаниях на сжатие с помощью испытательного стенда МEGEON-03000.

	Образец №IX		Образец №VII		Образец №VIII	
	Длина деформации образца, мм	Динамическая нагрузка, Н	Длина деформации образца, мм	Динамическая нагрузка, Н	Длина деформации образца, мм	Динамическая нагрузка, Н
1	0	0	0	0	0	0
2	0,3	22,2	0,3	45,1	0,27	24,6
3	0,43	27,4	0,55	68	0,54	54,1
4	0,52	31	0,64	83,4	0,68	72,7
5	0,64	35,5	0,79	100,2	0,81	87,3
6	0,74	40,3	0,9	105,9	0,95	104,9
7	0,88	46,9	1,18	120,8	1,07	122,8
8	1,05	53,5	1,32	128	1,24	148,4
9	1,24	61	1,52	141,5	1,36	162,5
10	1,37	64,1	1,75	150,8	1,49	181,6
11	1,5	69,5	1,98	158,6	1,62	199,9
12	1,67	77,1	2,21	164	1,8	235,1
13	1,8	81,3	2,5	166,8	1,97	259,8
14	2,04	92,6	2,71	171,5	2,12	283,2
15	2,28	99	2,9	175,4	2,25	304,1
16	2,45	105,2	3,09	180,3	2,45	339,7
17	2,72	119	3,36	193,8	2,6	356,8

Продолжение таблицы 5

18	2,94	125,6			2,73	369,6
19	3,18	136,3			2,94	401,2
20	3,38	144,6			3,13	424
21	3,62	155,4				
22	3,94	173,5				
23	4,25	180,4				
24	4,51	193,6				

Таблица 6 – Результаты измерений образцов с наполнителем кристобалит при испытаниях на сжатие с помощью испытательного стенда МEGEON-03000.

	Образец №II		Образец №III		Образец №IV	
	Длина деформации образца, мм	Динамическая нагрузка, Н	Длина деформации образца, мм	Динамическая нагрузка, Н	Длина деформации образца, мм	Динамическая нагрузка, Н
1	0	0	0	0	0	0
2	0,37	66,6	0,22	30,3	0,18	59,2
3	0,63	93,5	0,45	67,2	0,34	101,1
4	0,81	107,3	0,64	96,3	0,49	150,1
5	0,95	125,4	0,82	126,5	0,69	213,9
6	1,09	141	0,99	155,9	0,77	244,7
7	1,23	159,5	1,19	186,4	0,95	312
8	1,39	184,4	1,34	205,8	1,18	380,5
9	1,58	202,7	1,54	234,3	1,34	429,4
10	1,76	227	1,7	250,4	1,46	472,2
11	1,94	243,7	1,84	262,7	1,64	531,3
12	2,14	259,1	1,95	275,9	1,79	589,4
13	2,38	271,7	2,06	284,4	1,96	656,8
14	2,77	293,8	2,22	305,3	2,13	729,8
15	3,03	306,5	2,34	313	2,36	831,7
16	3,29	323,4	2,48	329,4		
17	3,52	337,3	2,69	354,6		

Продолжение таблицы 6

18	3,89	363,4	2,87	369,2		
19			3,11	401,2		
20			3,3	422,9		

Построенные графики функций измеренных значений изменения длины образца под действием нагрузки представлены в приложении Б.



### 3.2 Результаты вычислений модуля Юнга и коэффициента упругости при испытаниях на сжатие

Результаты вычислений модуля Юнга и коэффициента упругости при испытаниях на сжатие представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты вычислений модуля Юнга и коэффициента упругости при испытаниях на сжатие.

Массовое содержание наполнителя, %	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент упругости Гука, Н/мм
Кристобалит		
40	12,57	112,80
50	16,33	152,14
60	40,86	337,92
Гидроксид алюминия		
20	19,87	230,68
40	21	190,35
50	17,36	160,71
60	12,47	122,86
Прокаль		
40	36,76	429,28
60	14,63	125,77
70	11,99	117,28
Кварц марки Б		
50	5,54	39,4
40	8,14	73,57
60	7,23	52,71
70	15,83	135

### 3.3 Графики функций, построенные по посчитанным значениям при испытаниях на сжатие

Построенные графики функций зависимости модуля Юнга от массового содержания наполнителя представлены на рисунках 6-9.

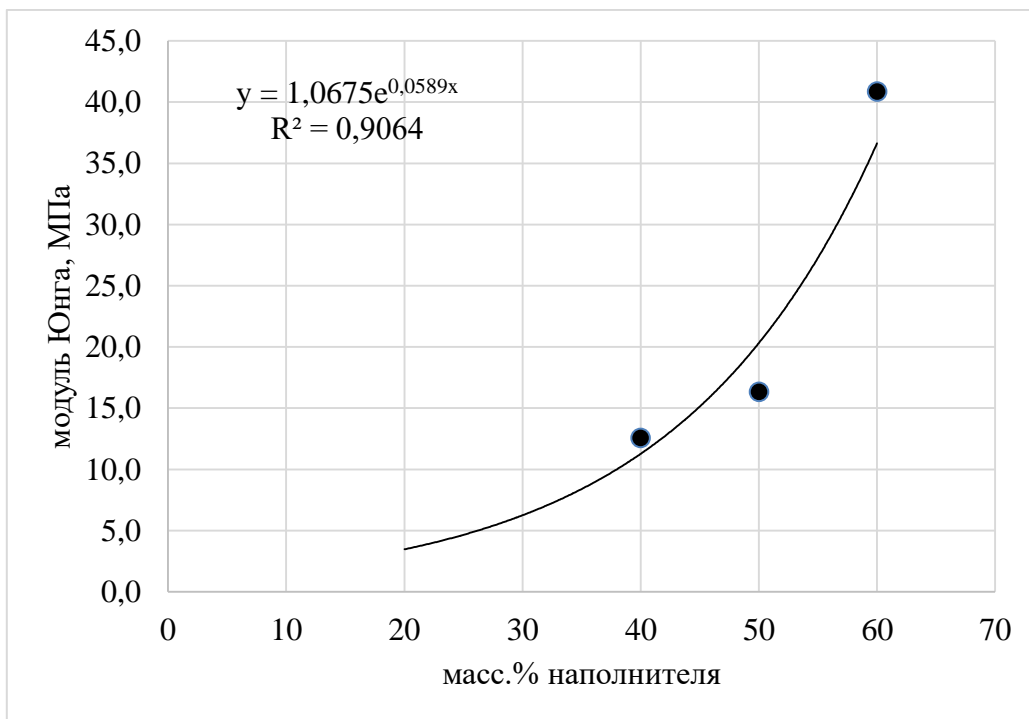


Рисунок 6– График зависимости модуля Юнга от массового содержания наполнителя кристобалит

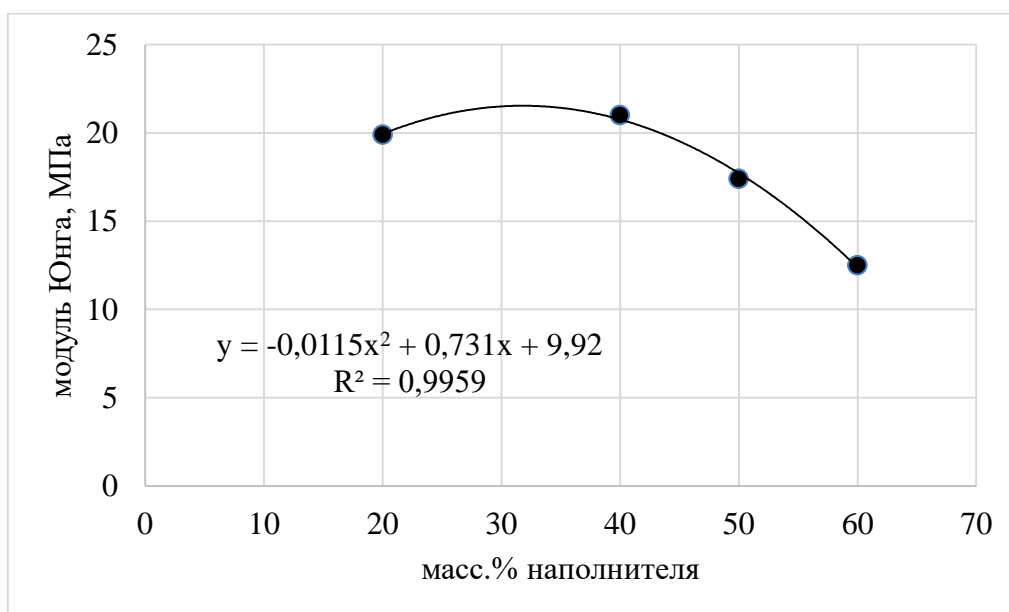


Рисунок 7– График зависимости модуля Юнга от массового содержания наполнителя гидроксид алюминия

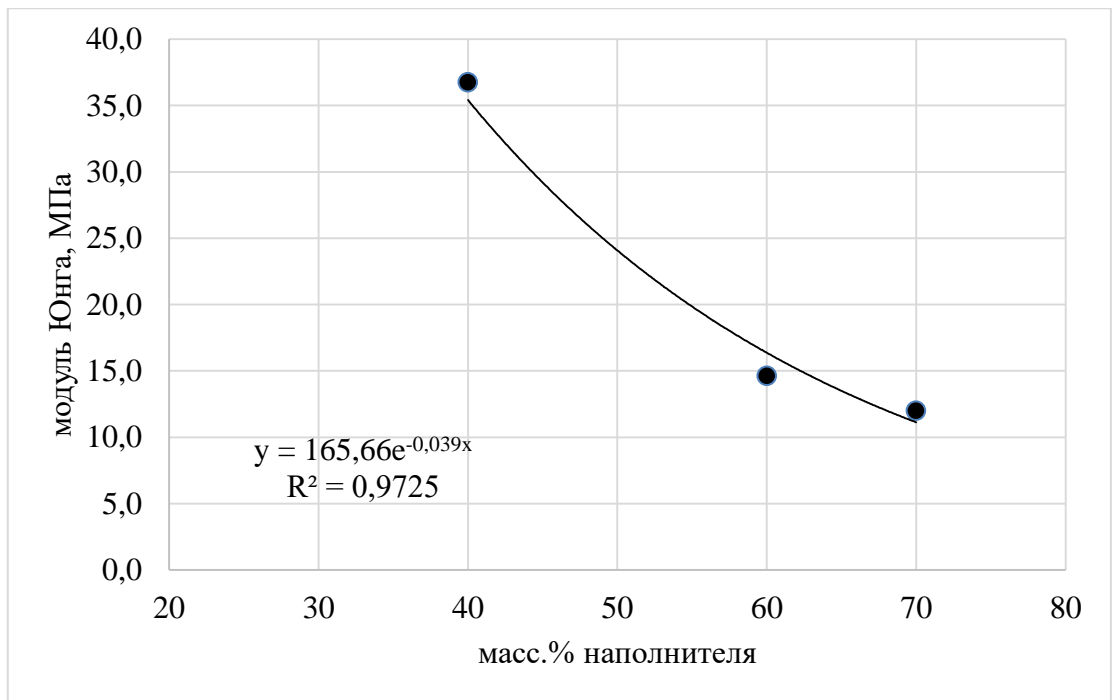


Рисунок 8– График зависимости модуля Юнга от массового содержания наполнителя прокаль

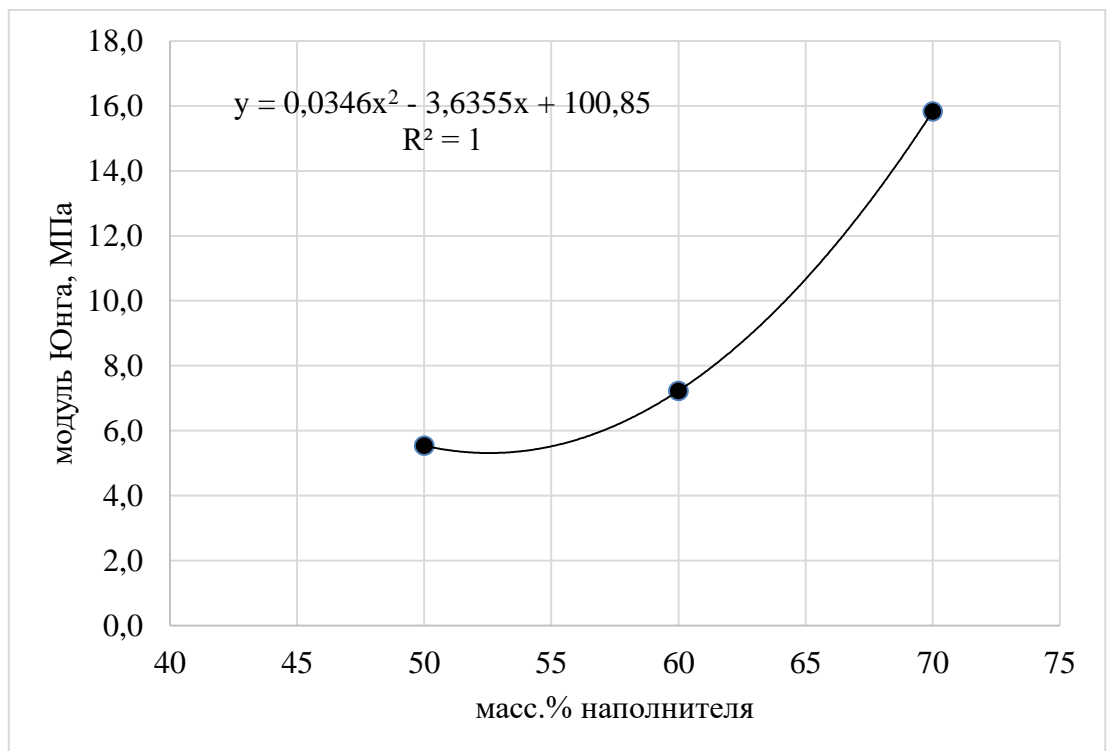


Рисунок 9– График зависимости модуля Юнга от массового содержания наполнителя кварц марки Б

В результате проведения расчетов на сжатие были получены модуль Юнга и коэффициент упругости Гука.

Анализируя графики, представленные на рисунках 6-9, можно сделать вывод, что с введением в матрицу наполнителей: кварц и кристобалит (рисунки 6 и 9), упругие свойства материала увеличиваются, а при введении в матрицу наполнителей: гидроксид алюминия и прокаль (рисунки 7-8), упругие свойства материала уменьшаются.

### 3.4 Результаты измерений образцов при испытаниях на разрыв

Результаты измерений образцов с мелкодисперсными наполнителями при испытаниях на разрыв с помощью испытательного стенда МEGEON-03000 представлены в таблицах 8-11.

Таблица 8 – Результаты измерений образцов с наполнителем гидроксид алюминия при испытаниях на разрыв с помощью испытательного стенда МEGEON-03000.

Образец №	Первоначальная длина образца, мм	Изменение длины образца в момент разрыва, мм	Ширина образца, мм	Толщина образца, мм	Растягивающая нагрузка, при которой образец разрушился, Н	Массовое содержание наполнителя, %
б/н	45,4	19,42	19,2	2,15	31,7	0
51	41,58	6,05	11	2,8	125,5	50
52	44,7	5,56	8,7	2,76	151,5	60
54	42,2	3,23	10,3	3,8	68,7	35

Таблица 9 – Результаты измерений образцов с наполнителем кристобалит при испытаниях на разрыв с помощью испытательного стенда МEGEON-03000.

Образец №	Первоначальная длина образца, мм	Изменение длины образца в момент разрыва, мм	Ширина образца, мм	Толщина образца, мм	Растягивающая нагрузка, при которой образец разрушился, Н	Массовое содержание наполнителя, %
б/н	45,4	19,42	19,2	2,15	31,7	0
б/н	43,5	19,16	17,5	2,5	129	33,3
б/н	25,46	9,49	9,25	2,5	182,1	50

Таблица 10 – Результаты измерений образцов с наполнителем кварц марки Б при испытаниях на разрыв с помощью испытательного стенда МЕГЕОН-03000.

Образец №	Первоначальная длина образца, мм	Изменение длины образца в момент разрыва, мм	Ширина образца, мм	Толщина образца, мм	Растягивающая нагрузка, при которой образец разрушился, Н	Массовое содержание наполнителя, %
б/н	45,4	19,42	19,2	2,15	31,7	0
43	41	7,65	14	1,1	32,7	60
44	43	9,22	11,36	1,72	44,6	70
б/н	40,5	23,13	9,6	1	19	30
б/н	40	16,62	8,2	1	16,62	40

Таблица 11 – Результаты измерений образцов с наполнителем прокаль при испытаниях на разрыв с помощью испытательного стенда МEGEON-03000.

Образец №	Первоначальная длина образца, мм	Изменение длины образца в момент разрыва, мм	Ширина образца, мм	Толщина образца, мм	Растягивающая нагрузка, при которой образец разрушился, Н	Массовое содержание наполнителя, %
б/н	45,4	19,42	19,2	2,15	31,7	0
б/н	38,5	53,5	10,6	1,6	48,6	30
б/н	40	24,66	11	3,8	157,2	50
б/н	40,6	19,54	8,64	1,48	51,8	60
б/н	36	20,02	10,5	2,1	100,8	70



### 3.4 Результаты вычислений прочности, относительного удлинения и коэффициента упругости при испытаниях на разрыв

Результаты вычислений прочности, относительного удлинения и коэффициента упругости при испытаниях на разрыв представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Результаты вычислений прочности, относительного удлинения и коэффициента упругости при испытаниях на разрыв

Массовое содержание наполнителя, %	Прочность, МПа	Относительное удлинение, %	Коэффициент упругости Н/мм
Полиуретан			
0	0,77	42,78	1,63
Кристобалит			
33,3	2,95	44,05	6,73
50	7,87	37,27	19,19
Кварц марки Б			
60	2,12	18,66	4,27
70	2,28	21,44	4,84
30	1,98	57,11	0,82
40	2,03	41,55	1
Гидроксид алюминия			
50	4,07	14,55	20,74
60	6,31	12,44	27,25
35	1,76	7,65	21,27
Прокаль			
30	2,87	55,6	5,03
50	3,76	61,6	6,37
60	4,05	142,5	1,67
70	4,57	138,9	0,9

### 3.5 Графики функций, построенные по посчитанным значениям при испытаниях на разрыв

Построенные графики функций зависимости прочности от массового содержания наполнителя представлены на рисунках 10-13.

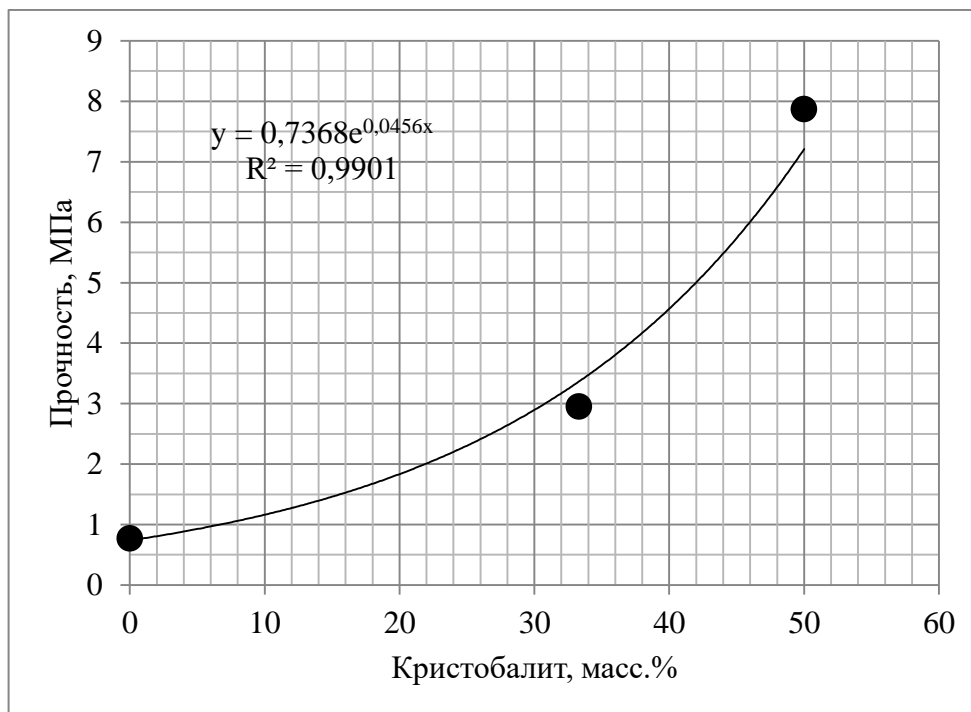


Рисунок 10 – График зависимости прочности от массового содержания наполнителя кристобалит

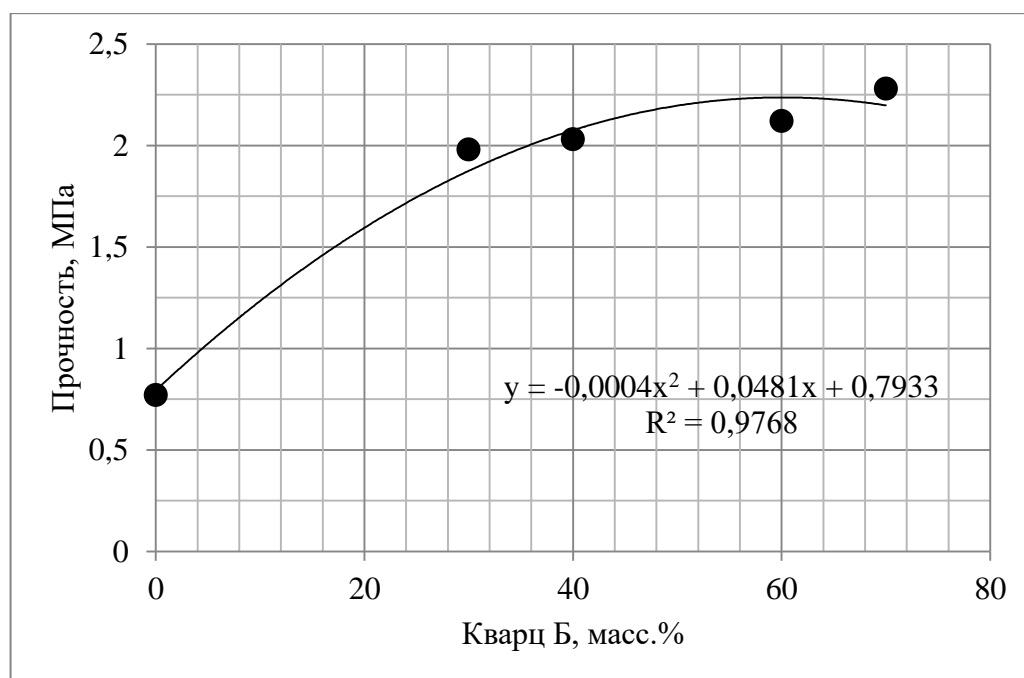


Рисунок 11 – График зависимости прочности от массового содержания наполнителя кварц марки Б

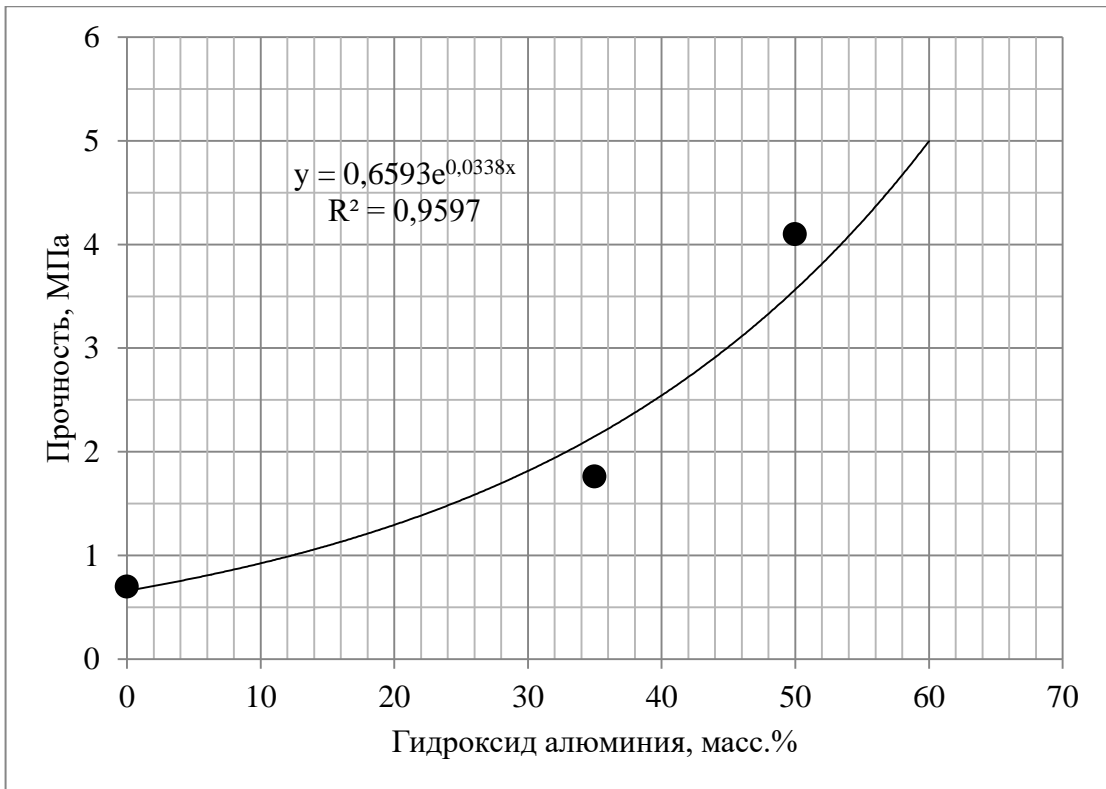


Рисунок 12 – График зависимости прочности от массового содержания наполнителя гидроксид алюминия

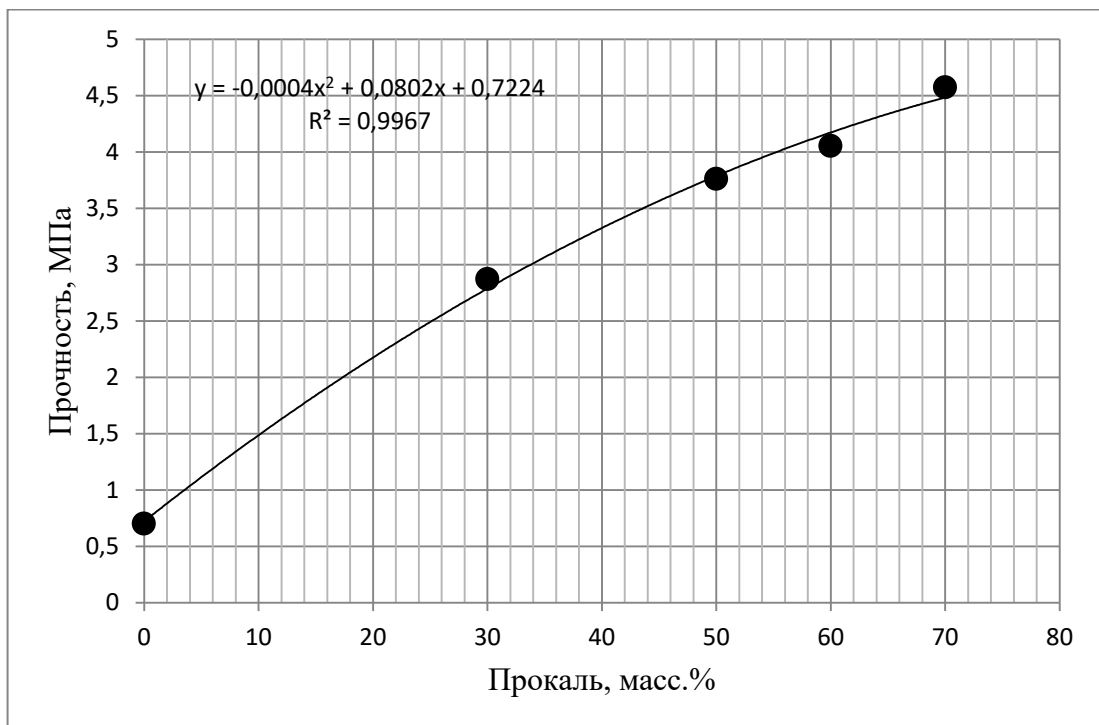


Рисунок 13 – График зависимости прочности от массового содержания наполнителя прокаль

В результате проведения испытаний на разрыв были получены значения прочности, относительного удлинения и коэффициента упругости.

Анализируя графики, представленные на рисунках 10-13, можно сделать вывод, что с введением в матрицу наполнителей, прочностные свойства материала увеличиваются.

### **Вывод по третьему разделу**

Обобщая результаты, достигнутые в рамках данного раздела, следует отметить следующее:

- 1) проведены измерения новых композиционных материалов со связующим на основе полиуретана и наполнителей различной природы, введенных в разных пропорциях;
- 2) рассчитаны прочностные характеристики композиционных материалов на основе полиуретанового связующего.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью выпускной квалификационной работы являлось исследование прочностных характеристик композиций на основе полиуретанового связующего с минеральными наполнителями.

В результате анализа актуальности исследований композиционных материалов на основе полиуретана установлено, что потребность подобных испытаний растет с каждым годом, в связи с появлением новых составов синтетических полимеров. В качестве исследуемых характеристик выбраны прочность и упругость.

В рамках первого раздела были проанализированы требования нормативно – технической документации к методам, оборудованию и образцам для проведения исследований.

В ходе второго раздела была разработана методика испытаний электроизоляционных материалов, которая соответствует требованиям ГОСТ 19.301-79 «Программа и методика испытаний. Требования к содержанию и оформлению».

Также, в третьем разделе, были проведены исследования композиционных материалов на основе полиуретана по разработанной методике, результаты которых подтверждают применимость методики для объективной оценки прочностных характеристик синтетических полимеров.

Таким образом, задачи, поставленные в выпускной квалификационной работе, полностью решены.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кербер М. Л. Композиционные материалы / М. Л. Кербер // Соросовский образовательный журнал / Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева. 1999. Вып. 5. С.33–41
2. ГОСТ 24888-81 ГОСТ 24888-81 Пластмассы, полимеры и синтетические смолы. Химические наименования, термины и определения. ТЕХЭКСПЕРТ ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД ПРАВОВОЙ И НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ. URL <http://docs.cntd.ru/document/1200018626/>
3. Khalid Mahmood Zia. Algae Based Polymers, Blends, and Composites. Chemistry, Biotechnology and Materials Science / Khalid Mahmood Zia, Mohammad Zuber, Muhammad Ali // Book, 2017. Pages 33-54
4. ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) Пластмассы. Метод испытания на растяжение. ТЕХЭКСПЕРТ ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД ПРАВОВОЙ И НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ. URL <http://docs.cntd.ru/document/1200158280/>
5. ГОСТ Р 58017-2017 Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Сжатие. ТЕХЭКСПЕРТ ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД ПРАВОВОЙ И НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ. URL <http://docs.cntd.ru/document/1200157977>
6. ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002) Пластмассы. Метод испытания на сжатие. ТЕХЭКСПЕРТ ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД ПРАВОВОЙ И НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ. URL <http://docs.cntd.ru/document/1200110855/>
7. ГОСТ 12423-2013 (ISO 291:2008) Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб). ТЕХЭКСПЕРТ ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД ПРАВОВОЙ И НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ. URL <http://docs.cntd.ru/document/1200107314/>
8. Руководство по эксплуатации «МЕГЕОН. Динамометры цифровые сжатия и растяжения серии МЕГЕОН-03XXX»

9. ГОСТ 19.301-79 Единая система программной документации (ЕСПД). Программа и методика испытаний. Требования к содержанию и оформлению. ТЕХЭКСПЕРТ ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД ПРАВОВОЙ И НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ. URL <http://docs.cntd.ru/document/1200007650>



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

СОГЛАСОВАНО

\_\_\_\_\_ (Ф.И.О)

\_\_\_\_\_ (подпись)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020\_г.

УТВЕРЖДАЮ

\_\_\_\_\_ (Ф.И.О)

\_\_\_\_\_ (подпись)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020\_г.

\_\_\_\_\_ (Ф.И.О)

\_\_\_\_\_ (подпись)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_г.

### МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СО СВЯЗУЮЩИМ НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНА

Санкт-Петербург  
2020

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Графики функции изменения длины образца под действием нагрузки представлены на рисунках 14 - 39

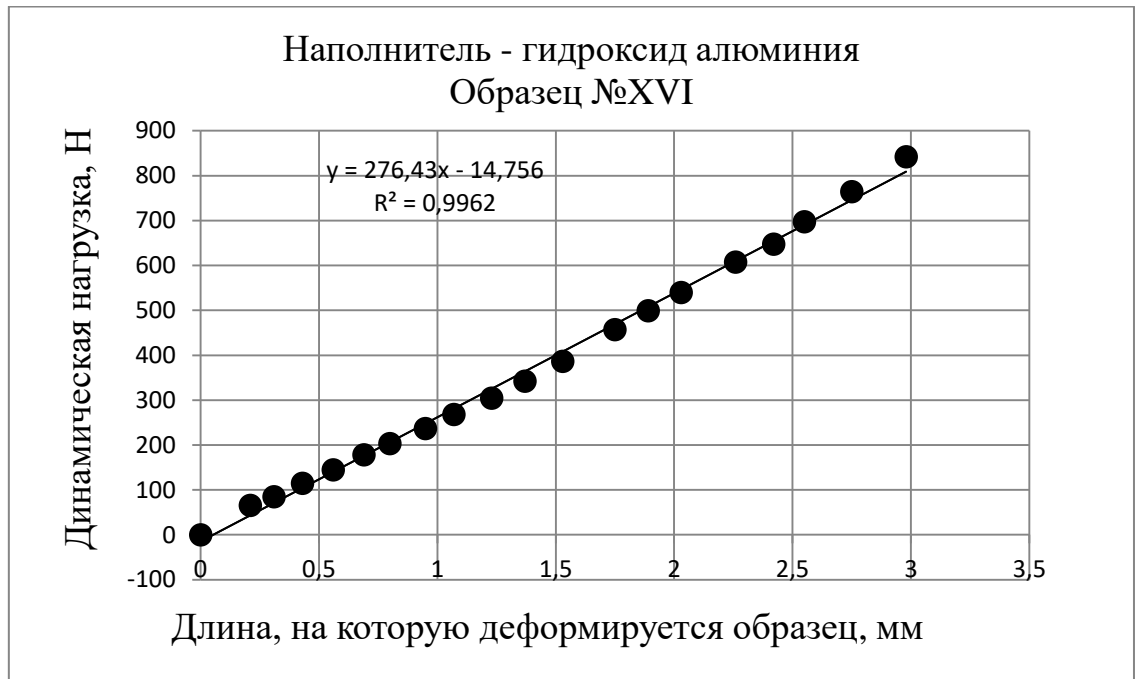


Рисунок 14 – График зависимости измеренных значений изменения длины образца под действием нагрузки

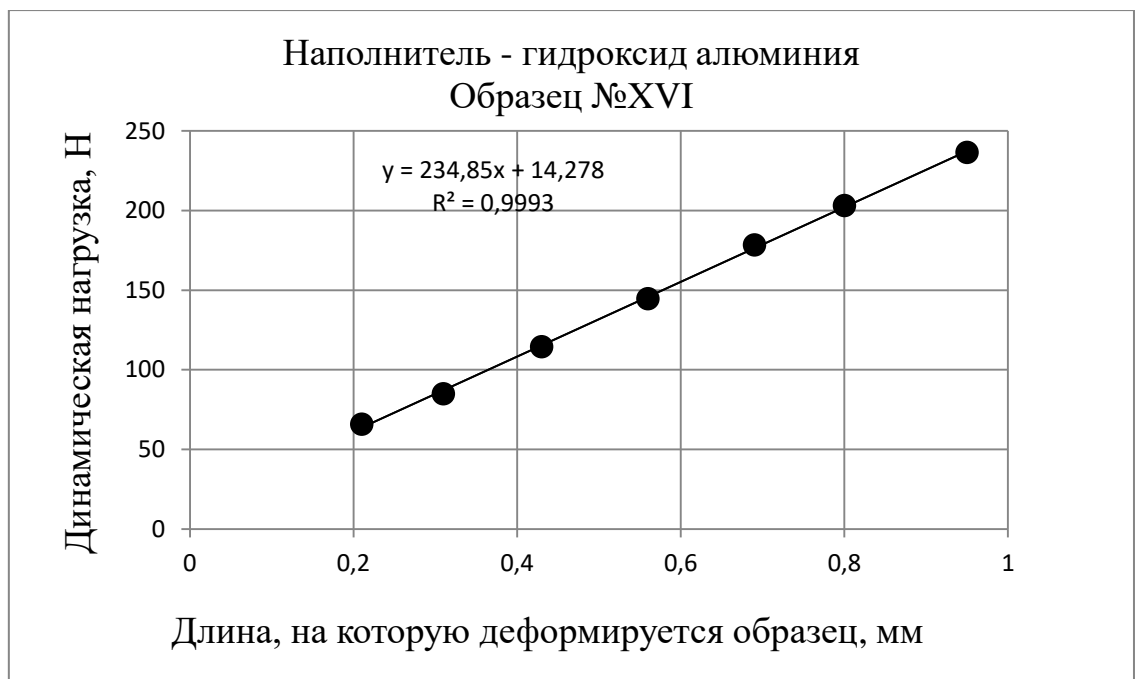


Рисунок 15 – График зависимости измеренных значений изменения образца №XVI







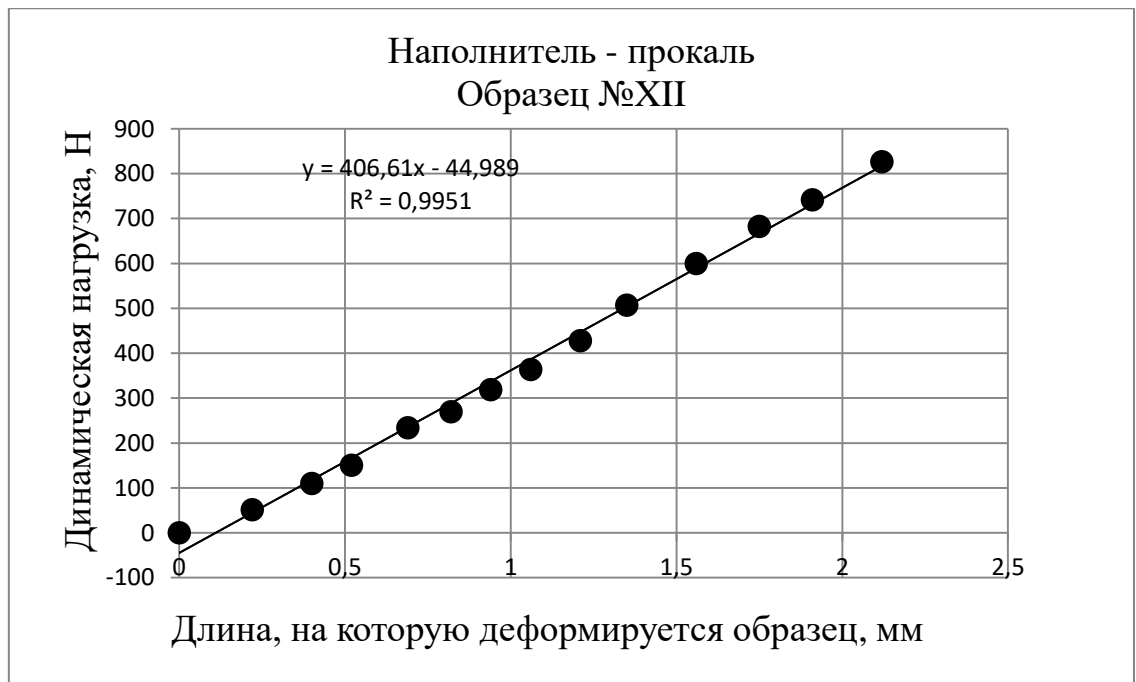


Рисунок 22 – График зависимости измеренных значений изменения длины образца под действием нагрузки

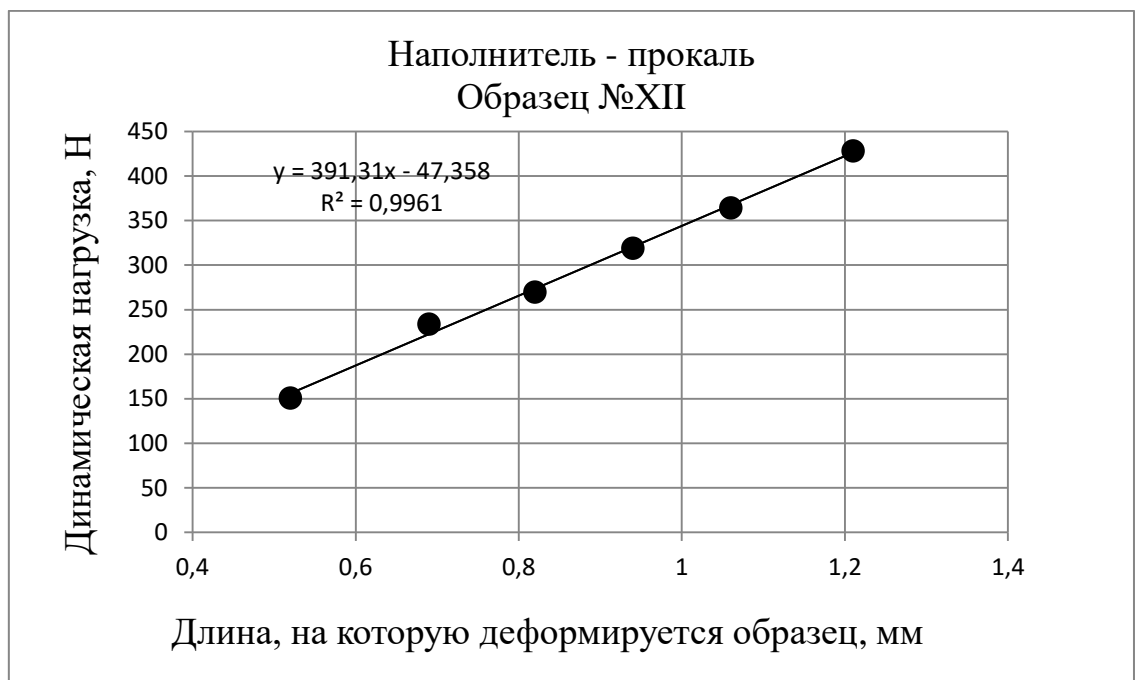


Рисунок 23 – График зависимости измеренных значений изменения образца №XII

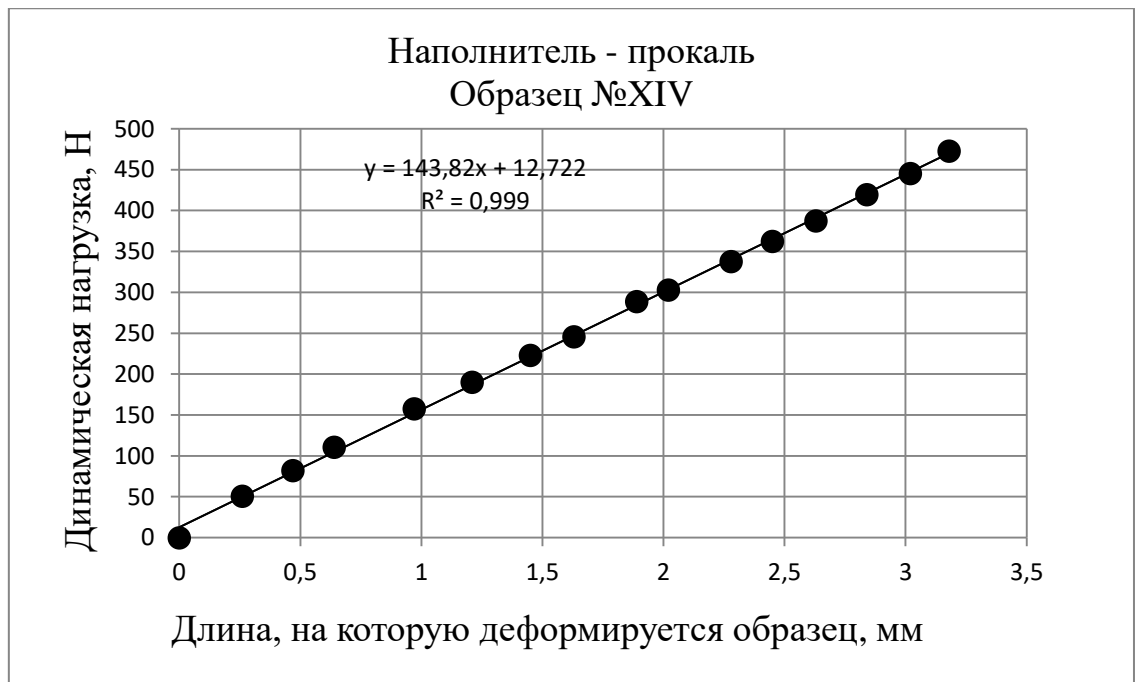


Рисунок 24 – График зависимости измеренных значений изменения длины образца под действием нагрузки

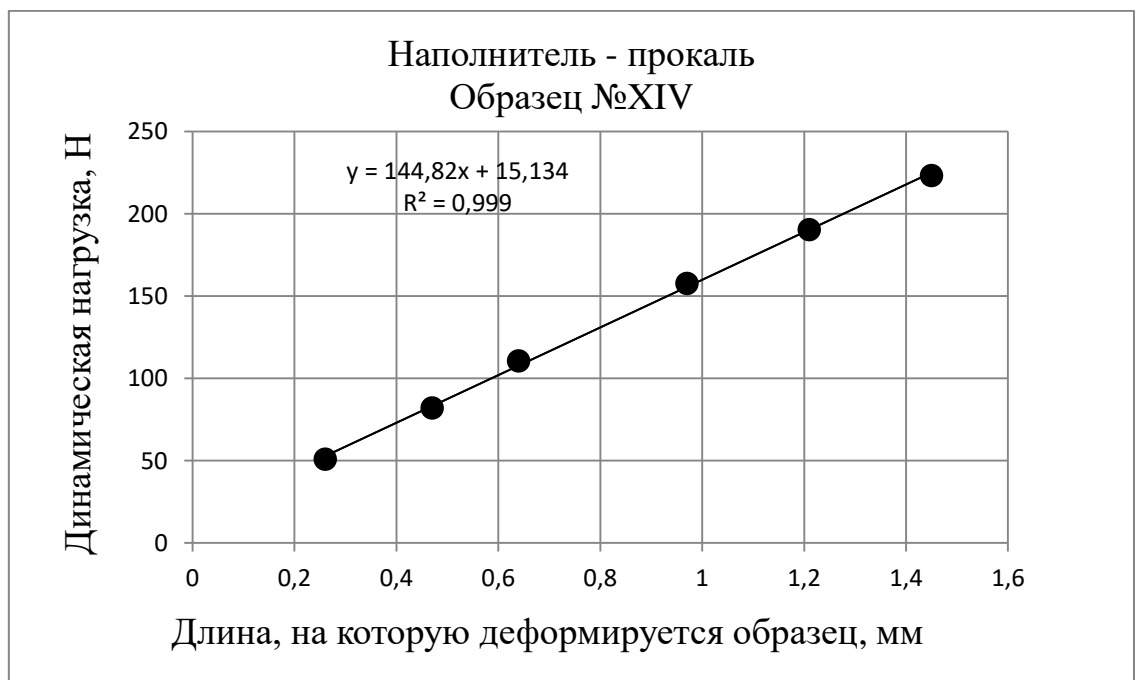


Рисунок 25 – График зависимости измеренных значений изменения образца №XIV





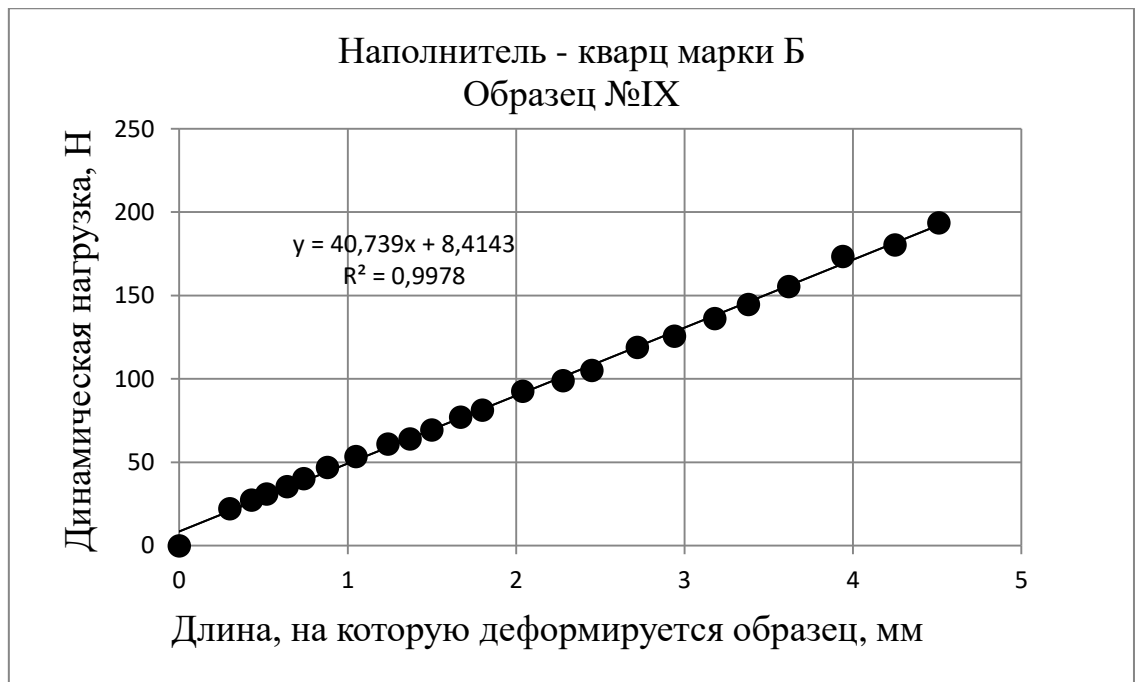


Рисунок 28 – График зависимости измеренных значений изменения длины образца под действием нагрузки

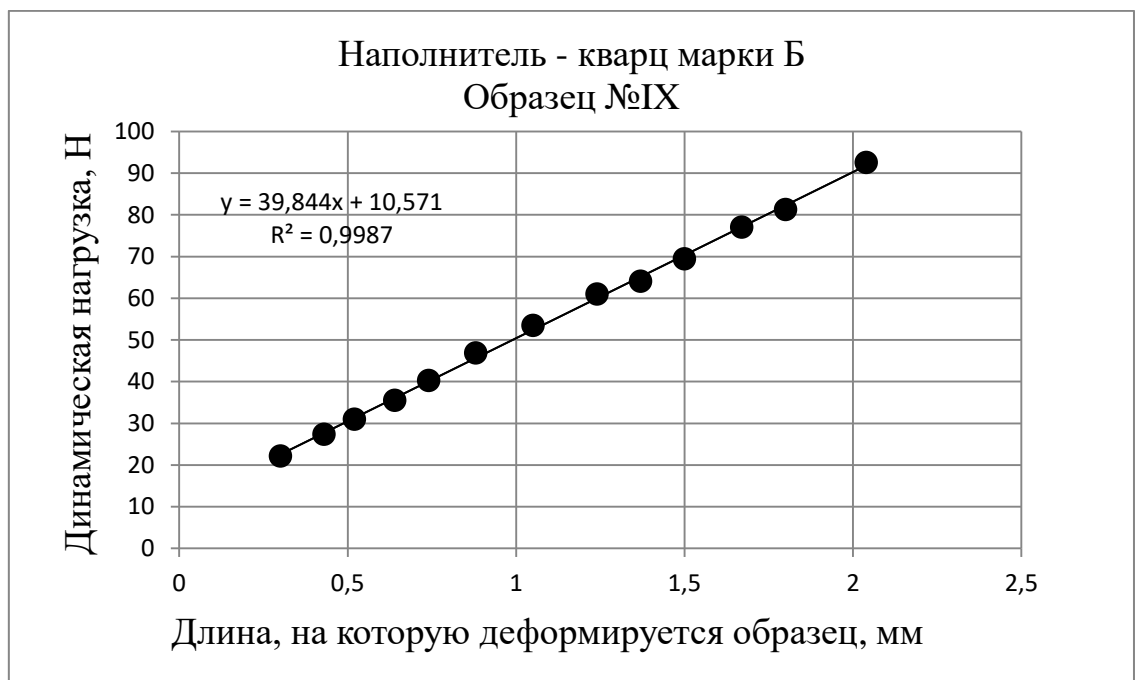


Рисунок 29 – IX

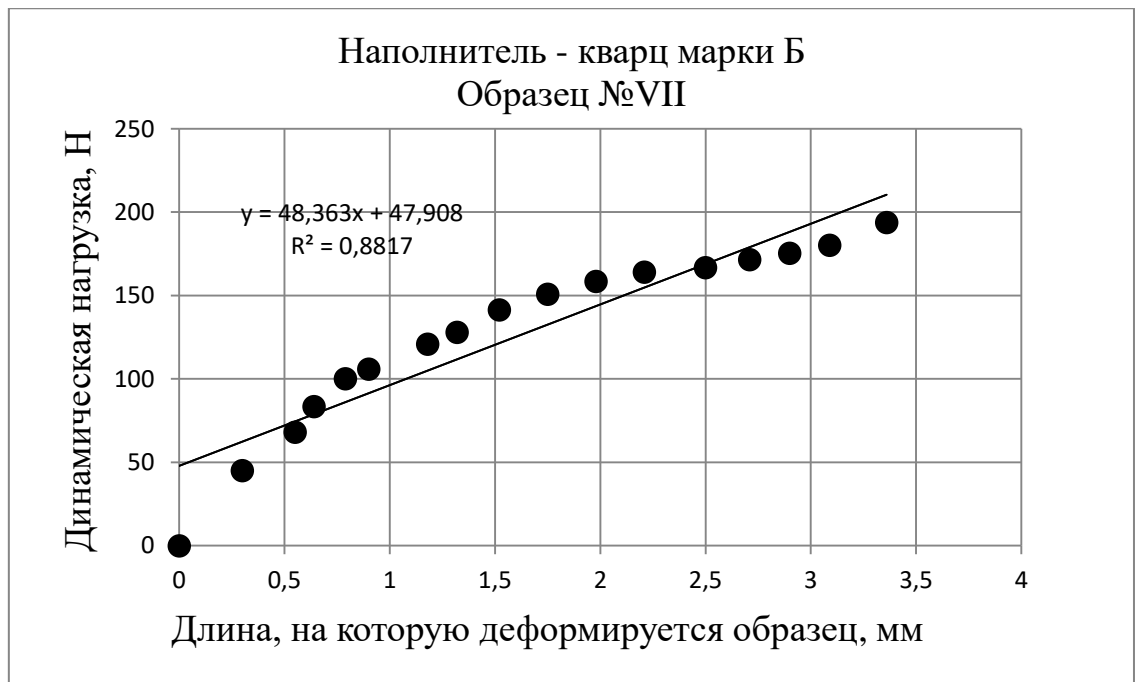


Рисунок 30 – График зависимости измеренных значений изменения длины образца под действием нагрузки

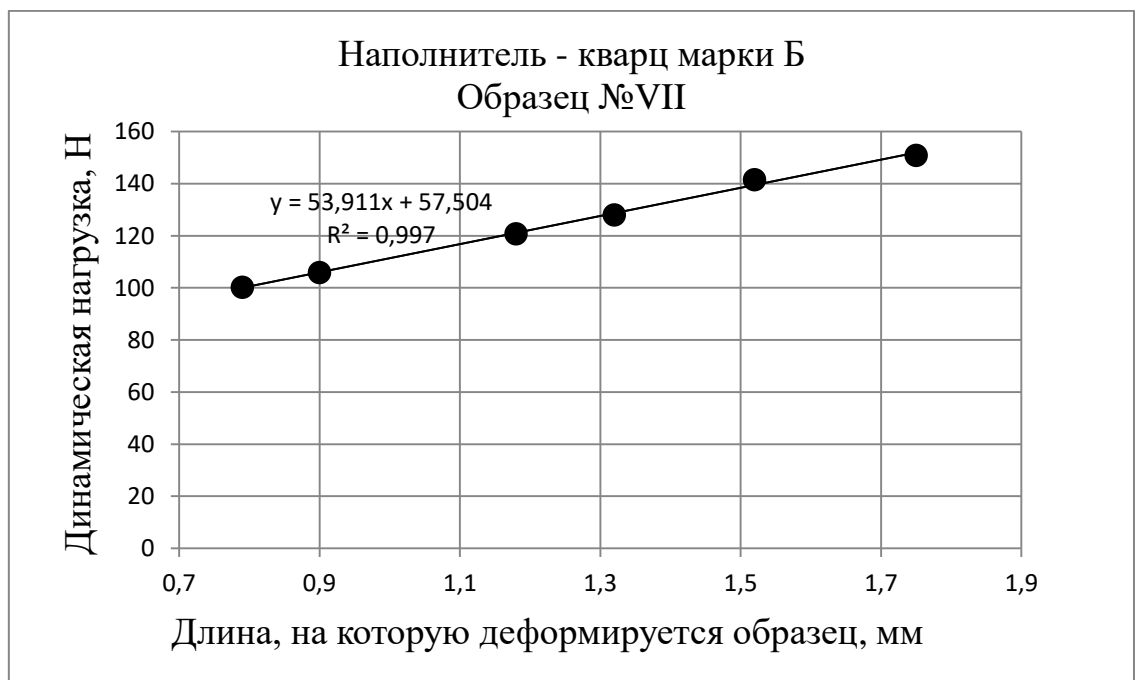


Рисунок 31 – График зависимости измеренных значений изменения образца №VII



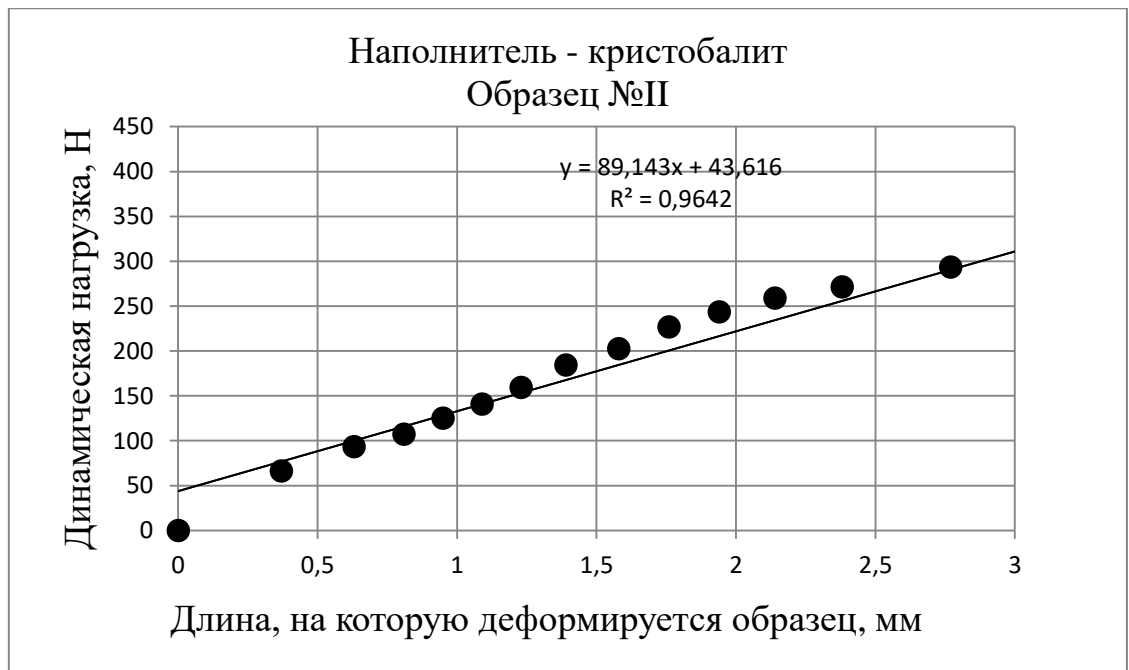


Рисунок 34 – График зависимости измеренных значений изменения длины образца под действием нагрузки

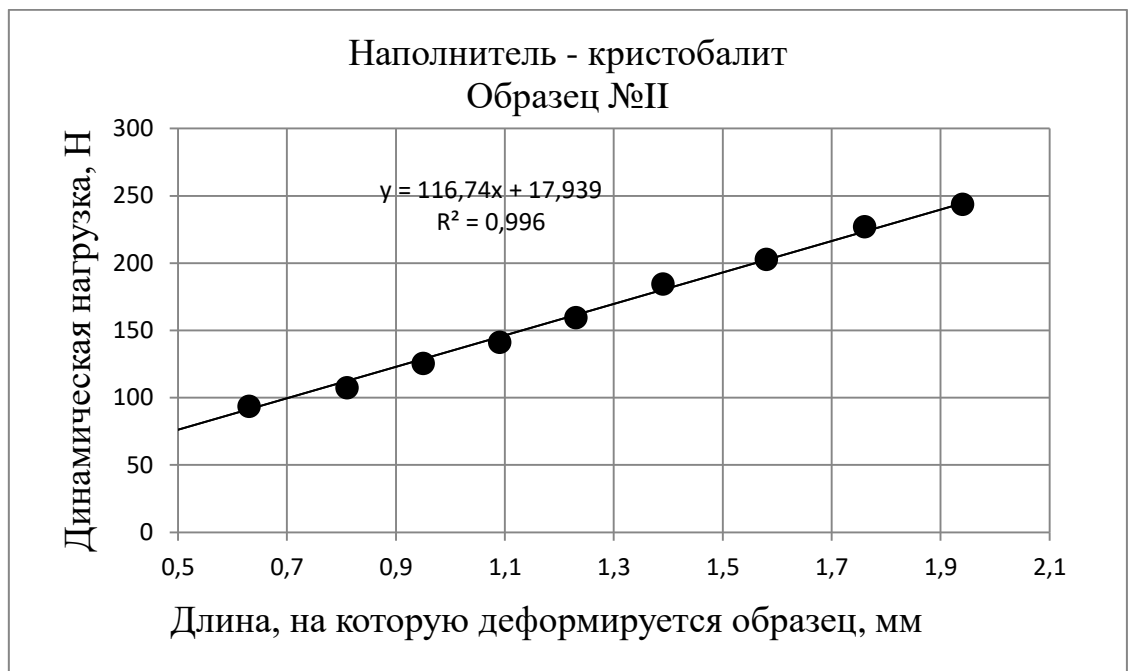


Рисунок 35 – График зависимости измеренных значений изменения образца №II

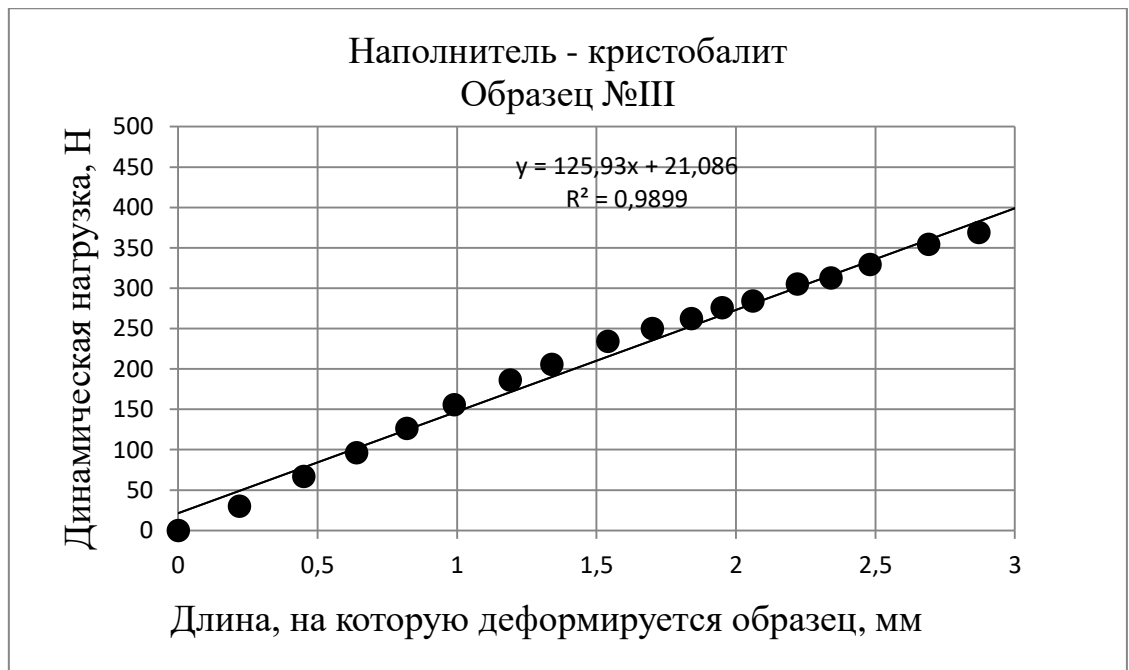


Рисунок 36 – График зависимости измеренных значений изменения длины образца под действием нагрузки

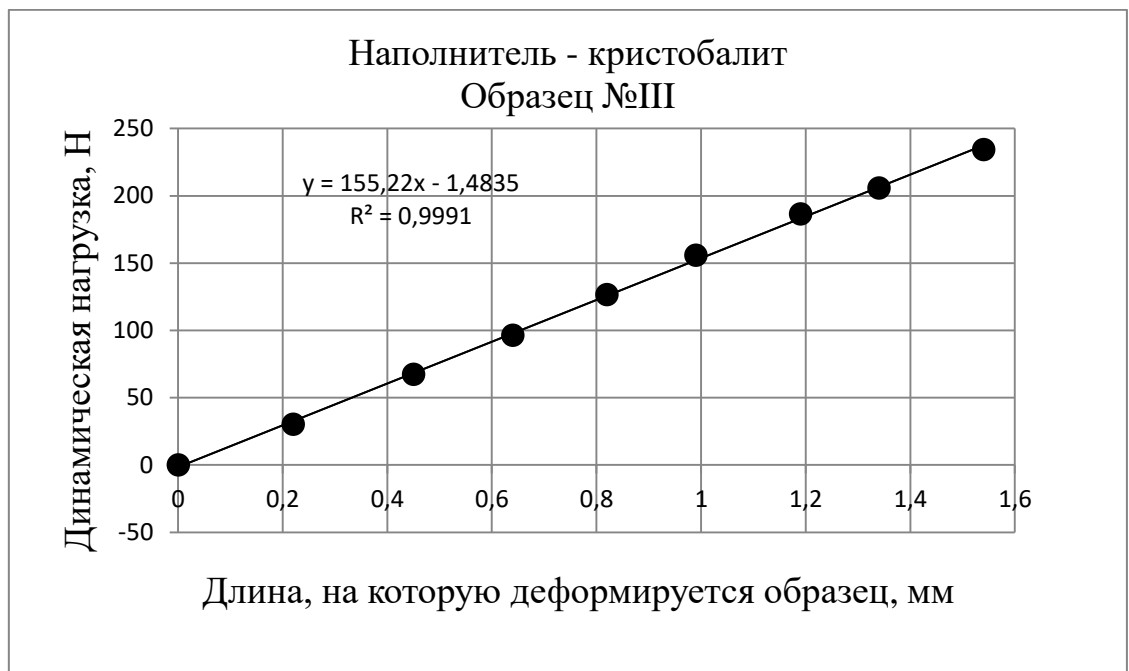


Рисунок 37 – График зависимости измеренных значений изменения образца №III

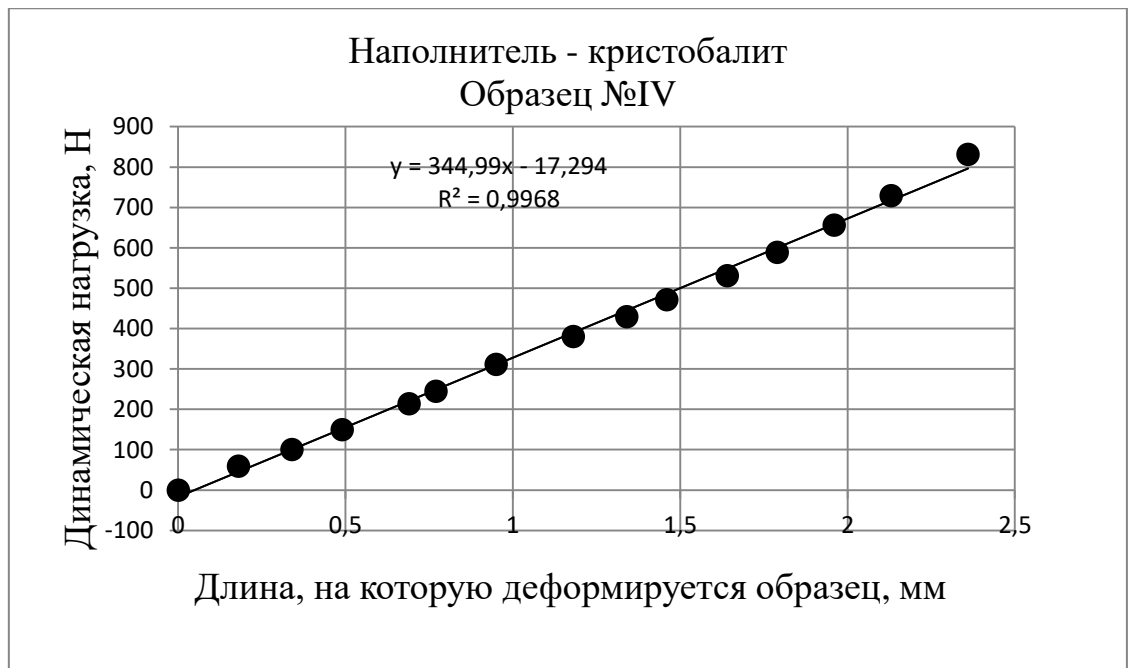


Рисунок 38 – График зависимости измеренных значений изменения длины образца под действием нагрузки

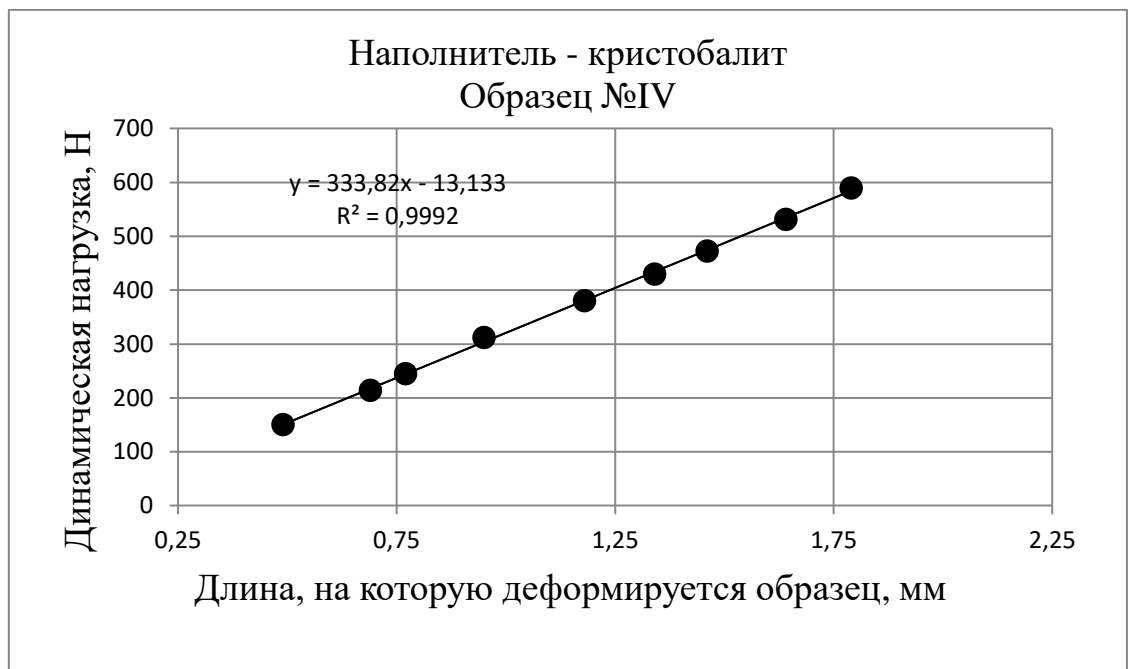


Рисунок 39 – График зависимости измеренных значений изменения образца №IV