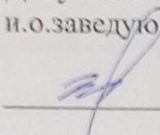


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ) ФЕДЕРАЛЬНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Отделение автомобильное
Кафедра материалов, технологий и качества

Направление подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии
материалов»

Допустить к защите
и.о.заведующий кафедрой МТиК

 / Гумеров И.Ф./

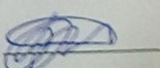
«25» 06 2018г.

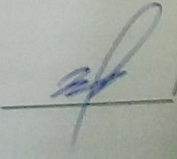
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Магистерская диссертация

МД 1. 22.04.01. 18. 001 ПЗ

на тему: КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБРИДНОГО
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Выпускник  / Багдануров Фиргат Фаилевич /


Руководитель ВКР  / Шафигуллин Л.Н., к.т.н., доцент, доцент/

Набережные Челны 2018 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ) ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Отделение Автомобильное
Кафедра Материалы, технологии и качества
Направление подготовки 22.04.01 Материаловедение и технология материалов
Профиль Материаловедение и технология материалов

УТВЕРЖДАЮ
и.о.заведующий кафедрой

 / Гумеров И.Ф./

« 25 » 06 2018 г.

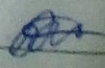
ЗАДАНИЕ

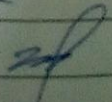
на выполнение выпускной квалификационной работы

1. Выпускник Багдануров Фиргат Фаилевич
2. Руководитель Шафигуллин Ленар Нургалиевич к.т.н., доцент каф. МТК.
3. Квалификация Магистрант
4. Тема ВКР «Разработка элементов гибридного электродвигателя из композиционных материалов»
утверждена приказом по институту от «25» декабря 2017 г. №10/796
5. Исходные данные: стеклопластиковые детали, дисперсионнаполненные композитные материалы.
6. Содержание работы: анализ предметной области, материалы и методы исследований, исследование физико-механических свойств, разработка элементов.
7. Перечень отчетных материалов: анализ предметной области; материалы и методы исследований; физико-механических свойств, разработка элементов.
8. Наличие публикаций и выступлений на конференциях по теме выпускной работы:
 1. Победитель конкурса «УМНИК-2014»;
 2. Патент на изобретение №2622284 «Электрическая машина (варианты)»
 3. Победитель конкурса лучшая студенческая научная работа КФУ – 2015г.;
 4. Автор научной статьи: «IX Камские чтения»: всероссийская научно-практическая конференция. (2017; Набережные Челны). В 3-х ч. Часть 1. Всерос. научн.-практ. конф. «IX Камские чтения», 21 апреля 2017г. [Текст]: сб-к док. / под ред. д-ра техн. наук Л.А.Симоновой.–Набережные Челны: Издательско-полиграфический центр Набережночелнинского института КФУ, 2017. Автор Багдануров Ф.Ф. «Разработка составляющих гибридного электродвигателя» с. 11-16.
 5. Автор научной статьи: Сборник научных статей Казанского федерального университета 2015 года: сборник статей / Мин-во образования и науки; Казанский (Приволжский) федеральный ун-т. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015. –412 с. «Разработка Гибридного электродвигателя, совмещающего принципы работы шагового и асинхронного электродвигателей, для устройств, работающих при переменной нагрузке на вал» с. 326-329
 6. Участник конкурса лучшая студенческая научная работа КФУ – 2017г.;
 7. Победитель всероссийского инновационного конкурса НГТУ 2017г.

Дата выдачи задания
« 27 » 06 2018 г.

Дата представления ВКР к защите
« 25 » 06 2018 г.

Выпускник  / Багдануров Ф.Ф. /

Руководитель  / Шафигуллин Л.Н. /

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН выполнения основных и дополнительных разделов выпускной квалификационной работы

Основные разделы ВКР:

Наименование раздела работы	Плановый срок выполнения раздела	Фактический срок выполнения раздела	Ф.И.О. руководителя подпись
1. анализ предметной области	10.06.2018	10.06.2018	Шафигуллин Л.Н <i>Шафигуллин Л.Н</i>
2. материалы и методы исследований	15.06.2018	15.06.2018	Шафигуллин Л.Н <i>Шафигуллин Л.Н</i>
3. исследования физико-механических свойств	20.06.2018	20.06.2018	Шафигуллин Л.Н <i>Шафигуллин Л.Н</i>
4. разработка элементов конструкции гибридного электродвигателя из композиционных материалов	26.06.2018	26.06.2018	Шафигуллин Л.Н <i>Шафигуллин Л.Н</i>

Дополнительные разделы ВКР:

Наименование раздела работы	Плановый срок выполнения раздела	Фактический срок выполнения раздела	Ф.И.О. консультанта, подпись
1. Приложение 1-2	10.06.2018	10.06.2018	Шафигуллин Л.Н <i>Шафигуллин Л.Н</i>
2. Приложение 3-4	15.06.2018	15.06.2018	Шафигуллин Л.Н <i>Шафигуллин Л.Н</i>
3. Приложение 5-6	20.06.2018	20.06.2018	Шафигуллин Л.Н <i>Шафигуллин Л.Н</i>
4. Приложение 7-9	26.06.2018	26.06.2018	Шафигуллин Л.Н <i>Шафигуллин Л.Н</i>

Руководитель выпускной
квалификационной работы

Шафигуллин Л.Н
Шафигуллин Л.Н

Задание принял к исполнению

Багдануров Ф.Ф.
Багдануров Ф.Ф.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ) ФЕДЕРАЛЬНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

АННОТАЦИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

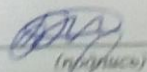
Выпускник Багдануров Фиргат Фаилевич
Отделение Автомобильное Группа 1161343
Направление подготовки 22.04.01 Материаловедение и технология материалов
Профиль Материаловедение и технология материалов
Наименование темы: Разработка элементов гибридного электродвигателя из композиционных материалов.
Руководитель Шафигуллин Ленар Нургалеевич, к.т.н., доцент заместитель заведующего кафедры МТК.

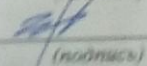
ХАРАКТЕРИСТИКА ВКР

1. Тема ВКР Разработка элементов гибридного электродвигателя из композиционных материалов
2. Цель работы является исследование и разработка элементов гибридного электродвигателя из композиционных материалов.
3. Сведения об объеме, количестве иллюстраций, таблиц, использованных источников: 84 стр., 26 таблицы, 37 рисунка, 40 источника литературы, 13 приложений.
4. Ключевые слова: стеклопластик, дисперсионнаполненные материалы, полиэфирная смола.
5. Использование информационных ресурсов Internet: да, 19 ссылки
6. Использование современных пакетов компьютерных программ и технологий: да, Microsoft Office, КОМПАС-2D, Siemens NX, SolidWorks, Solid Edge.
7. Результаты работы: исследованы физико-механические свойства материалов, разработаны новые дисперсионнаполненные композитные материалы, разработан прототип гибридного электродвигателя.

Выпускник

Руководитель


(подпись)


(подпись)

« 25 » 00 2018 г.

Содержание.

Введение.....	4
1. Анализ предметной области.....	5
1.1 Анализ электродвигателей применяемых в производстве.....	5
1.1.1. Асинхронные двигатели.....	5
1.1.2. Шаговые электродвигатели.....	9
1.2 Анализ материалов, применяемых в конструкции электродвигателей.....	11
1.3 Патентный поиск.....	15
1.4 Применение программных комплексов для анализа конструктивных решений, применяемых в машиностроении.....	17
2. Материалы и методы исследования.....	20
2.1 Исследуемые материалы.....	20
2.2 Методы исследования.....	27
2.3 Статистическая обработка экспериментальных данных.....	35
3. Исследование физико-механических и технических свойств материалов, применяемых в конструкции электродвигателя.....	40
3.1 Исследование на массапоглощение.....	40
3.2 Исследование предела прочности при изгибе.....	41
3.3 Исследование предела прочности при одноосном сжатии.....	42
3.4 Исследование предела прочности при растяжении.....	42
3.5 Исследование теплопроводности.....	43
4. Разработка элементов конструкции гибридного электродвигателя из композитных материалов.....	50
4.1 Техническое задание на конструкцию гибридного электродвигателя.....	50
4.2 Разработка статора электродвигателя.....	52
4.2.1 Разработка обоймы статора.....	55
4.2.2. Разработка бобины катушки.....	56

4.3	Конструирование дисков ротора электродвигателя.....	62
4.4	Разработка промежуточной втулки.....	66
4.5	Разработка крайней втулки.....	68
4.6	Разработка крышек.....	69
4.7	Разработка корпуса.....	74
	Заключение.....	80
	Список литературы.....	81

Введение.

Сегодняшний день почти невозможно представить без электричества. Электродвигатели распространились во всех сферах жизнедеятельности. Во многих областях промышленности используются классические асинхронные двигатели, достоинством которых является высокая надёжность. Недостатком двигателей является низкий КПД. Эти машины были изобретены ещё более ста лет назад. Существуют более совершенные шаговые электродвигатели, требующие дорогостоящих контроллеров управления, имеющих характерную полосу разгона. Достоинством двигателей является большой крутящий момент, импульсное управление, позволяющее точно задавать количество оборотов в минуту. Применение данных типов двигателей ограничено – станки, промышленное оборудование. С целью улучшения эксплуатационных характеристик рассматриваемых двигателей предложена концепция гибридного двигателя, использующего преимущества шагового и асинхронного электродвигателей. Но данный вид двигателя не может быть сконструирован с использованием стандартного набора материалов. Поэтому для разработки гибридного электродвигателя применены уже известные композитные материалы и разработаны новые, которые дали возможность получения нестандартных геометрических форм и высокий КПД. Целью работы является разработка элементов конструкции гибридного электродвигателя из композиционных материалов.

.Задачи:

1. Проанализировать принципы работы электродвигателей;
2. Изучить материалы, применяемые в электродвигателях;
3. Провести патентный поиск;
4. Выбрать материалы для элементов гибридного электродвигателя;
5. Разработать материалы для элементов гибридного электродвигателя и провести испытания.

6. Разработать элементы конструкции гибридного электродвигателя из композиционных материалов.

1. Анализ предметной области.

1.1. Анализ электродвигателей, применяемых в производстве.

1.1.1 Асинхронные электродвигатели.

Первый тип электродвигателей, который широко распространены – это асинхронные электродвигатели[1].

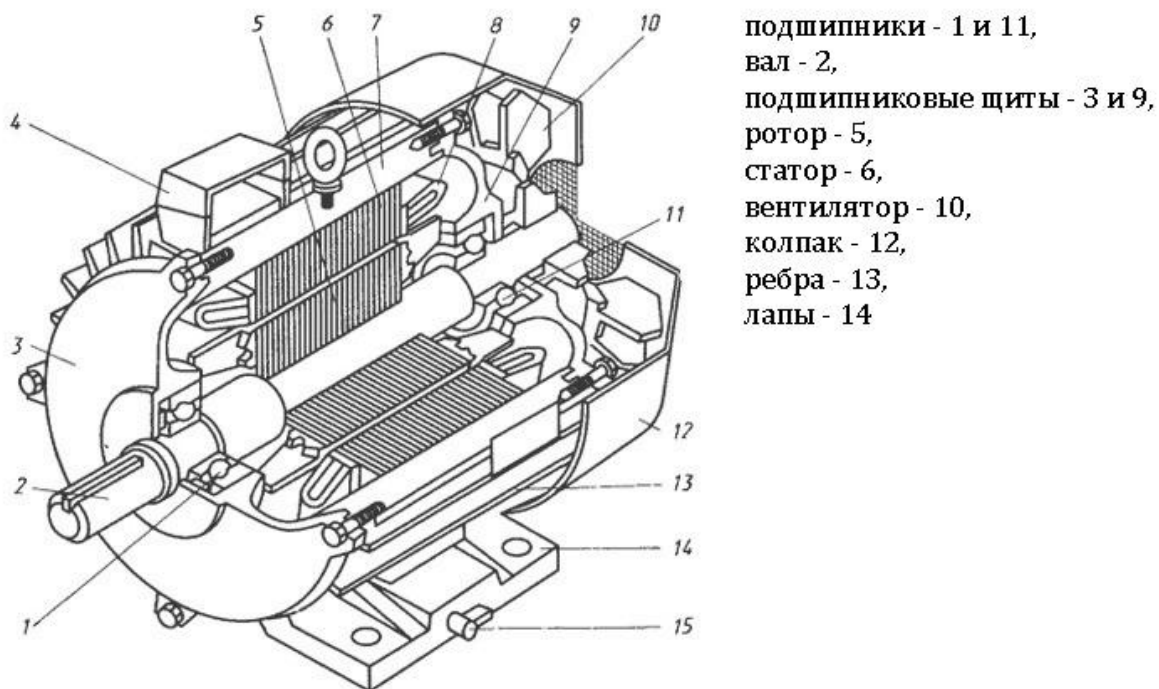


Рисунок 1 – Разрез асинхронного электродвигателя.

Асинхронная машина – электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой не равна (в двигательном режиме меньше) частоте вращения магнитного поля, создаваемого током обмотки статора.

В ряде стран к асинхронным машинам причисляют также коллекторные машины. Второе название асинхронных машин — индукционные обусловлено тем, что ток в обмотке ротора индуцируется вращающимся полем статора. Асинхронные машины сегодня составляют большую часть электрических машин. В основном они применяются в качестве электродвигателей и являются основными преобразователями электрической

энергии в механическую, причём в основном используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АДКЗ).

Достоинства (для АДКЗ):

1. Простота изготовления.
2. Относительная дешевизна.
3. Высокая надёжность в эксплуатации.
4. Невысокие эксплуатационные затраты.
5. Возможность включения в сеть без каких-либо преобразователей

(для нагрузок, не нуждающихся в регулировке скорости).

Все вышеперечисленные достоинства являются следствием отсутствия механических коммутаторов в цепи ротора и привели к тому, что большинство электродвигателей, используемых в промышленности – это асинхронные машины, в исполнении АДКЗ.

Недостатки:

1. Небольшой пусковой момент.
2. Значительный пусковой ток.
3. Низкий коэффициент мощности.
4. Сложность регулирования скорости с необходимой точностью.
5. Максимальная скорость двигателя ограничена частотой сети (для АДКЗ, питаемых непосредственно от трёхфазной сети 50 Гц — это 3000 об/мин).

6. Сильная зависимость (квадратичная) электромагнитного момента от напряжения питающей сети (при изменении напряжения в 2 раза вращающий момент изменяется в 4 раза; у ДПТ вращающий момент зависит от напряжения питания якоря в первой степени, что более благоприятно).

Самым совершенным подходом к устранению вышеуказанных недостатков – это питание двигателя через частотный преобразователь, в котором управление производится по сложным алгоритмам.

Асинхронная машина имеет статор и ротор, разделённые воздушным зазором. Её активными частями являются обмотки и магнитопровод

(сердечник); все остальные части — конструктивные, обеспечивающие необходимую прочность, жёсткость, охлаждение, возможность вращения и т. П.

Обмотка статора представляет собой трёхфазную (в общем случае — многофазную) обмотку, проводники которой равномерно распределены по окружности статора и пофазно уложены в пазах с угловым расстоянием 120° . Фазы обмотки статора соединяют по стандартным схемам «треугольник» или «звезда» и подключают к сети трёхфазного тока. Магнитопровод статора перемагничивается в процессе изменения тока в обмотке статора, поэтому его набирают из пластин электротехнической стали для обеспечения минимальных магнитных потерь. Основным методом сборки магнитопровода в пакет является шихтовка.

По конструкции ротора асинхронные машины подразделяют на два основных типа: с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором. Оба типа имеют одинаковую конструкцию статора и отличаются лишь исполнением обмотки ротора. Магнитопровод ротора выполняется аналогично магнитопроводу статора — из пластин электротехнической стали.

На обмотку статора подаётся переменное трехфазное напряжение, под действием которого по этим обмоткам протекает трехфазная система токов. Поскольку обмотки в асинхронной машине сдвинуты друг от друга в геометрическом отношении на 120 градусов, и, так как в симметричной системе токи в обмотках имеют фазовый сдвиг в 120 градусов, в таких обмотках создаётся вращающееся магнитное поле. Вращающееся магнитное поле, пересекая проводники обмотки ротора, индуцирует в них электродвижущую силу, под действием которой в обмотке ротора протекает ток, который искажает магнитное поле статора, увеличивая его энергию, что ведет к возникновению электромагнитной силы, под действием которой ротор начинает вращаться. Для более простого объяснения, можно сослаться на силу Ампера, действующую на проводники обмотки ротора, которые находятся в магнитном поле статора; однако, в действительности, величина

магнитной индукции в пазу, где располагается проводник с током, достаточно мала, поскольку магнитный поток проходит преимущественно по зубцам. Чтобы в обмотке ротора возникла ЭДС, необходимо, чтобы скорость вращения ротора отличалась от скорости вращения поля статора. Поэтому ротор вращается асинхронно относительно поля статора, а двигатель называется асинхронным. Относительная разность скорости вращения ротора от скорости вращения поля статора называется скольжением. Номинальное скольжение обычно составляет 2-8%.

1.1.2. Шаговые электродвигатели.

Второй тип электродвигателей из широко распространённых электродвигателей – это шаговый двигатель [2].

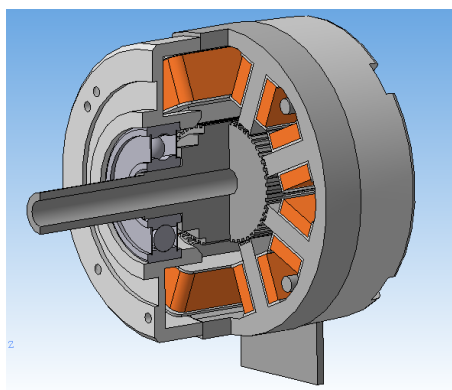


Рисунок 2 – Разрез шагового электродвигателя

Шаговый электродвигатель – это синхронный бесщёточный электродвигатель с несколькими обмотками, в котором ток, подаваемый в одну из обмоток статора, вызывает фиксацию ротора. Последовательная активация обмоток двигателя вызывает дискретные угловые перемещения (шаги) ротора.

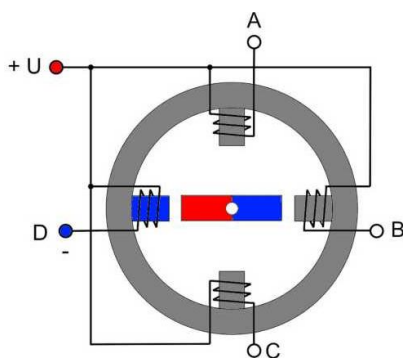


Рисунок 3 – Схема работы шагового электродвигателя.

Конструктивно шаговые электродвигатели состоят из статора, на котором расположены обмотки возбуждения, и ротора, выполненного из магнито-мягкого или из магнито-твёрдого материала. Шаговые двигатели с магнитным ротором позволяют получать большой крутящий момент и обеспечивают фиксацию ротора при обесточенных обмотках.

Режим дробления шага (микрошаг) реализуется при независимом управлении током обмоток шагового электродвигателя. Управляя соотношением токов в обмотках можно зафиксировать ротор в промежуточном положении между шагами. Таким образом можно повысить плавность вращения ротора.

Шаговые двигатели создают сравнительно высокий момент при низких скоростях вращения. Момент существенно падает при увеличении скорости вращения.

При этом, несмотря на удобство пользования и хорошую точность и повторяемость, необходимо учитывать, что:

- без вращения вала нет ЭДС; определить положение стоящего вала нельзя.

Возможна остановка вала в зоне неустойчивого равновесия (промежуточно между полюсами) ШД. Последующий пуск вала приведёт к тому, что, в зависимости от чувствительности компаратора, будет пропуск этого полюса, или два импульса вместо одного. В обоих случаях все дальнейшие отсчёты будут с ошибкой на один шаг. Для практически полного, но не 100%, устранения такого поведения необходимо применить муфту с соответствующим гистерезисом (угловым люфтом).

Возможность «проскальзывания» ротора — наиболее известная проблема этих двигателей. Это может произойти при превышении нагрузки на валу, при неверной настройке управляющей программы (например, ускорение старта или торможения не адекватно перемещаемой массе), при приближении скорости вращения к резонансной. Электрически это никак не может быть замечено, поэтому контроллер все последующие движения будет производить

с ошибкой. Для ответственных применений устанавливают датчики обратной связи (контроль вращения или перемещения), но такие датчики достаточно дороги. Наличие датчика позволяет обнаружить проблему, но автоматически скомпенсировать её без остановки производственной программы возможно только в очень редких случаях. Чтобы избежать проскальзывания ротора, как один из способов, можно увеличить мощность двигателя.

1.2. Материалы используемые в электродвигателях.

Корпус электродвигателей изготавливается из чугуна или алюминиевого сплава. В основном используются сплавы АЛ4 и СЧ25

Таблица 2.1 – Механические свойства сплава АЛ4 [3]

Прокат	σ_B (Мпа)	σ_T (Мпа)	δ_5 (%)	КСУ (кДж / м ²)
литье в песчаную форму	260	200	4	500
литье под давлением	290	160	2	

Таблица 2.2 – Механические свойства сплава СЧ25 [4]

T (Град)	$E \cdot 10^{-5}$ (Мпа)	$\alpha \cdot 10^6$ (1/Град)	l (Вт/(м·град))	ρ (кг/м ³)	C (Дж/(кг·град))	σ_B (Мпа)
20	1		50	7200		250
100		10			500	250

Вал электродвигателя изготавливается из сталь 45. В таблице 2.3 приведены механические свойства стали 45. [5]

Таблица 2.3 – Механические свойства Сталь 45.

Термообработка	Сечение, мм	$\sigma_{0,2}$ (Мпа)	σ_B (Мпа)	δ_5 (%)	ψ %	КСУ (кДж / м ²)	НВ, не более
Нормализация Закалка. Отпуск	до 100	345	590	18	45	59	174- 217
	100-300	345	590	17	40	54	174- 217
	до 100	395	620	17	45	59	187- 229

Крышки электродвигателя изготавливаются из стали Ст3сп ГОСТ 380-71

Данная сталь применяется для изготовления ненагруженных деталей (преимущественно некрупных), и работающих без значительных динамических нагрузок: крышки, плиты, балки и т.п. [3, с.3]

Таблица 1.1 – Механические свойства стали Ст3

$\sigma_{0,2}$ (Мпа)	σ_B (Мпа)	δ_5 (%)	ψ %	КСУ (кДж / м ²)
640	780	11	40	59

Ротор и статор электродвигателей собирается из тонких листов электротехнической стали методом прессования. Технические характеристики электротехнической стали приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Технические характеристики электротехнической стали [6]

Марка стали	Толщина листа, мм	Удельные потери, Вт/кг, при В, тл			Индукция В, тл, при 300 ав/см
		1	1,5	1,7	
Э42	0,5	1,55— 1,4	3,5—3,1	—	1,90— 1,89
Э43— Э43А	0,5	1,25— 1,15	2,9—2,7	—	1,89

Обмотки электродвигателей собираются из медной проволоки марки «М0» изолированная лаком «МЛ-92».

Таблица 2.5 – Характеристики меди «М0» [7]

σ_B (МПа)	σ_T (МПа)	δ_5 (%)	T (Град)	$E \cdot 10^{-5}$ (МПа)	l (Вт/(м·град))	ρ (кг/м ³)	C (Дж/(кг·град))	$R \cdot 10^9$ (Ом·м)
200- 250	90- 150	60	20	1,32	387	8940	390	17,8

Лак МЛ-92 представляет собой раствор смеси глифталевого лака и меламиноформальдегидной смолы в органических растворителях.

Таблица 2.6 – Характеристики «МЛ-92» [8]

Параметр	Значение
Условная вязкость по вискозиметру ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм при температуре +20 ($\pm 0,5$) °С	25-50 с
Время высыхания до степени 3 при температуре +105-110 °С	не более 1 часа
Массовая доля нелетучих веществ в лаке	50-55 %
Способность просыхания лака в толстом слое при температуре 115-120 °С	не более 16 часов
Твердость пленки по маятниковому прибору М-3 при температуре окружающей среды +20 (± 1) °С	не менее 0,40 усл. Ед.
Электрическая прочность пленки при температуре +130 (± 2) °С, МВ/м:	не менее 40
Удельное объемное электрическое сопротивление пленки – при температуре +130 (± 2) °С	не менее 1.Е+9 Ом.*м

Для защиты мест соединения проводов используется термоусадочные трубки из полиэтилена низкого давления.

Таблица 2.7 – Характеристики полиэтилена низкого давления [9].

Параметр	Значение
Плотность, г/см ³	0,94-0,96
Разрушающее напряжение, кгс/см ²	
при растяжении	100—170
при статическом изгибе	120—170
при срезе	140—170
относительное удлинение при разрыве, %	500—600
модуль упругости при изгибе, кгс/см ²	1200—2600

1.3. Патентный поиск.

Найдены следующие патенты по тематике близко расположенных к теме данной работы.

1. № патента/заявки: 2010150493/02. Изобретение относится к металлургии алюминиевых сплавов и может быть использовано для изготовления катанки электротехнического назначения, деформированных полуфабрикатов, используемых в строительстве, машиностроении и других областях народного хозяйства. Сплав содержит следующие компоненты, мас. %: цирконий 0,1-0,19, кремний 0,11-0,15, железо 0,21-0,35, сумму примесей титана, хрома, ванадия и марганца до 0,015, алюминий – остальное. Получается сплав, имеющий при высокой механической прочности повышенные характеристики электропроводности и стойкости при повышенных температурах. 1 табл.

2. Электротехническое изделие, изготовленное из токопроводящего композиционного материала, и способ его изготовления // №2566247. Изобретение относится к изготовлению электротехнических изделий из композиционного материала. Электротехническое изделие изготовлено из токопроводящего композиционного материала формованием методом холодного прессования, при этом токопроводящий композиционный материал содержит 40÷55 мас. % порошка естественного графита, 30÷15 мас. % связующего на основе новолачной смолы, 30 мас. % медного порошка и дополнительно поливинилацетат в качестве пластификатора в количестве 9÷35 мас. % от суммарной массы порошкообразных компонентов. В способе получения электротехнического изделия смешивают порошок естественного графита и медный порошок, в полученную смесь вводят связующее, гомогенизируют смесь и вводят поливинилацетат, смешивают и сушат полученную массу при 45°С на протяжении 20 часов. Формуют изделие холодным прессованием и проводят высокотемпературную обработку со скоростью нагрева 1,5°С/мин до 1250°С и выдержкой в течение 3 часов.

Обеспечивается получение токопроводящего материала невысокой плотности, что облегчает процесс прессования и исключает расслоение изделия. 2 н.п. ф-лы, 4 пр

3. Патент №2394334 – Способ изготовления электрической машины. Изобретение относится к области электротехники и электромашиностроения, в частности к технологии изготовления электрических машин, и может использоваться, например, при изготовлении статоров и роторов электродвигателей, а также при изготовлении электромагнитных реле и электромагнитов. Согласно предлагаемому способу изготовления электрической машины, для получения статора и/или ротора в диаманитный материал, находящийся в жидком состоянии, вводят твердые частицы ферромагнитного материала. Заливают полученную смесь в форму, соответствующую форме ярма со сформированными местами полюсов. Устанавливают индуктор однонаправленного магнитного поля, располагая чередующиеся отрицательные и положительные полюсы индуктора напротив сформированных мест полюсов формы. Проводят выдержку смеси в однонаправленном магнитном поле до затвердевания диаманитного материала. Технический результат, достигаемый использованием данного изобретения, состоит в повышении технологичности процесса изготовления электрической машины за счет применения литейной технологии при обеспечении одновременного формирования ярма, полюсов и обмотки. При этом достигается анизотропное повышение магнитной проводимости за счет применения в качестве магнитопровода пространственно ориентированных твердых частиц ферромагнетика. 2 н. и 2 з.п. ф-лы, 2 ил

1.4 Применение программных комплексов для анализа конструктивных решений, применяемых в машиностроении.

В настоящее время для анализа конструктивных решений, применяемых в строительстве используются следующие программные комплексы:

1) ANSYS – универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа, существующая и развивающаяся на протяжении последних 30 лет, является довольно популярной у специалистов в сфере автоматизированных инженерных расчётов (CAE, Computer–AidedEngineering) и КЭ решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей. Моделирование и анализ в некоторых областях промышленности позволяет избежать дорогостоящих и длительных циклов разработки типа «проектирование – изготовление – испытания». Система работает на основе геометрического ядра Parasolid[32]. Программная система КЭ анализа ANSYS разрабатывается американской компанией ANSYS Inc.англ.Ansys [33].

2) NX Nastran– инструмент для проведения компьютерного инженерного анализа (CAE) проектируемых изделий методом конечных элементов (МКЭ) от компании Siemens PLM Software. NX Nastran вместе с дополнительными решателями предназначен для решения как статических, так и динамических линейных и нелинейных задач инженерного анализа [34].

3) SolidWorks (Солидворкс) — программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения. Работает в среде Microsoft Windows.

4) Solid Edge с синхронной технологией (Synchronous Technology) — система твердотельного и поверхностного моделирования от Siemens PLM Software, в которой реализованы как параметрическая технология моделирования на основе конструктивных элементов и дерева построения, так и технология вариационного прямого моделирования. Данная технология,

разработанная компанией Siemens PLM Software (до 1-го октября 2007 года UGS Corp.), получила название «синхронная технология».

Система Solid Edge построена на основе ядра геометрического моделирования Parasolid и вариационного решателя D-Cubed и использует графический пользовательский интерфейс Microsoft Fluent. Система Solid Edge предназначена для моделирования деталей и сборок, создания чертежей, управления конструкторскими данными, и обладает встроенными средствами конечноэлементного анализа (МКЭ).

Выводы по главе 1.

Изучено конструкции двигателей, применяемых в промышленности. В основном это асинхронные и шаговые двигатели. Первый заслуживает внимание по своей простоте и надёжности, а второй по своим высоким показателям. Типы применяемых материалов в обоих двигателях схожи. В основном это электротехнический сталь, сталь 40Х и Ст3. Рассмотрев их особенности строения и применяемые материалы, выяснено что есть необходимость разработки нового типа электродвигателя с использованием композиционных материалов.

2. Материалы и методы исследования

2.1 Исследуемые материалы

Для изготовления элементов гибридного электродвигателя необходимы материалы диамагнетики – материалы, которые не реагируют на магнитные поля. Так как детали требуется повышенные прочностные характеристики, принято решение конструировать детали из композитных материалов. Рассмотрены реактопласты с различными наполнителями, в частности: Смола ПН-609-21М, Neon S-1, Рефлекс, Norsodyne O-12335 AL, Novol Plus 720, Eskim ES-1060.

Смола ПН-609-21М выпускаемая по ГОСТ 27952-88 и представляет собой бесстирольную ненасыщенную полиэфирную смолу общего назначения. Смола ПН-609-21М не содержит стирол, вследствие чего является гораздо менее вредной для здоровья и обеспечивает лучшие условия труда по сравнению с обыкновенными полиэфирными смолами, содержащими стирол. Вместо стирола в качестве растворителя в составе смолы ПН-609-21М используется нелетучий мономер – олигоэфиракрилат ТГМ-3 (диметакриловый эфир триэтиленгликоля). [7]

Внешне смола ПН-609-21М представляет собой вязкую жидкость зеленого, желтого или коричневого цвета. Более ранняя маркировка смолы – НПС-609-21М.

Смола ПН-609-21М используется для изготовления изделий из стеклопластика методом контактного формования, а также перерабатывается и другими методами: свободным литьем, прессованием, центробежным формованием и т.д. Входит в состав различных лаков. Используется для изготовления полимербетона. Отверждается как при комнатной, так и повышенных температурах. Отличается от других марок более высокими механическими свойствами и теплостойкостью.

Таблица 2.1 – Характеристики смолы ПН-609-21М

1	Плотность при 23 °С, г/см ³	1,165-1,180	
2	Условная вязкость по ВЗ-246	20-32	
3	Время желатинизации при 25°С, мин с трехкомпонентной системой	40-200	
4	Динамическая вязкость при 23°С, Па*с (сП)	0,33-0,52 (330-520)	
5	Максимальная температура в процессе отверждения, °С, не менее	140	
6	Время достижения температуры, мин, не более	- От 65 до 90°С	18
		- От 65°С до максимальной	20
7	Водопоглощение за 24 ч, %	0,10-0,15	
8	Твердость по Бринеллю, кгс/см ²	15-20	

В смолу ПН-609-21М вводят навеску ускорителя ОК и тщательно перемешивают. Расход ускорителя ОК – 4% от массы смолы. Затем вводят навеску перекиси (инициатора Бутанокс) и снова тщательно перемешивают. Расход Бутанокса – 2% от массы ПН-609-21М. Очередность введения инициатора и ускорителя может быть изменена, но нельзя производить одновременное их введение, т.к. при их непосредственном контакте происходит бурная реакция вплоть до воспламенения и взрыва. Процесс рекомендуется проводить при окружающей температуре не менее 23 °С, при этом температура саморазогрева композиции в процессе отверждения достигает – 120-140 °С.

Гарантийный срок хранения ПН-609-21М – 6 месяцев со дня изготовления.

Отвердителем для полиэфирной смолы идёт бутэнокс М-50. Это вещество отличается средней реактивностью АО – 8,9%, содержит крайне низкое

количество воды и совсем не содержит полярных соединений, вроде этиленгликоля.

Смола ЭД-20 представляет собой растворимый и плавкий реакционно-способный олигомерный продукт на основе эпихлоргидрина и дифенилолпропана [8].

Таблица 2.2 – Характеристики смолы ЭД-20

	Высший сорт	Первый сорт
Внешний вид	Вязкая, прозрачная	Вязкая, прозрачная
Цвет по железо-кобальтовой шкале, не более	3	8
Массовая доля эпоксидных групп, %	20-22,5	20,2-22,5
Массовая доля иона хлора, %, не более	0,001	0,005
Массовая доля омыляемого хлора, %, не более	0,3	0,8
Массовая доля гидроксильных групп, %, не более	1,7	-
Массовая доля летучих веществ, %, не более	0,2	0,8
Динамическая вязкость, Па*сек, при (25±0.1)°С при (50±0.1)°С	13-20 - -	12-25 - -
Температура размягчения по методу «кольцо и шар», °С, не выше	-	-
Время желатизации, час., не менее	8	4

Эпоксидная смола ЭД-20 – двухкомпонентная смола. Для её отверждения требуются отвердители для эпоксидных смол (ПЭПА, ТЭТА, и т.д.). При использовании отвердителя марки ПЭПА (полиэтиленполиамин), его требуется от 5 до 30 %, в зависимости от вида работ. Среднее соотношение 10

-15% от массы смолы. Соединение смолы с отвердителем должно производиться при температуре не ниже чем 20 °С. Время желатинизации составляет, примерно – 1,5 часа, а время полного отверждения – 24 часа.

После сравнения обеих смол, выбрано полиэфирная смола из-за дешевизны по сравнению с эпоксидной смолой.

Таблица 2.3– Характеристики полиэфирной смолы [13].

Марка	Norsodyne H 44173
Описание	Изофталевая, высокая реакционная способность, жесткая, термо- и химостойкая
Вязкость	3,7
Время гелеобразования мин.	7 ^e
Содержание сухих веществ	56%
Прочность на изгиб, Мра	140
Модуль упругости – гости, Гра	3,5
Удлинение при разрыве	2,40%
Температура разрушения	95°С

В качестве армирующего элемента используются различные виды стекловолокон (Таблица 2.4).

Для электрической изоляции применяется только бесщелочное (или малощелочное) алюмосиликатное или алюмоборосиликатное стекловолокно. Для конструкционных стеклопластиков, как правило, используют бесщелочное магний алюмосиликатное или алюмоборосиликатное стекловолокно. Для стеклопластиков неответственного назначения можно употреблять и щелочесодержащее стекловолокно.

Таблица 2.4 – Виды и производители стекловолокна[13].

Тип стекловолокна	Изобретатель
А-стекло	Owens Corning
Е-стекло - электротехнического назначения, двухстадийное, в настоящее время одностадийное	Owens Corning
С-стекло - коррозионностойкое, двухстадийное	Owens Corning
Р-стекло - высокопрочное, двухстадийное	Vetrotex
S-Glass® - высокопрочное, двухстадийное	Owens Corning
AR-стекло - щелочестойкое, двухстадийное	Owens Corning
S2-Glass® - высокопрочное, тугоплавкое, двухстадийное	Owens Corning
ECR-стекло -электротехническое, коррозионностойкое, одностадийное	Owens Corning
Advantex® - стекло и технология, улучшение технологии плавки для печей большей мощности; сочетает в себе свойства стекла Е и ECR, одностадийное	Owens Corning
HPG-стекло (High Performance Glass) - высокопрочное стекло и технология на базе R-стекла, сочетает прочность и тугоплавкость, производство одностадийное в печах высокой производительности	Owens Corning
Н-стекло - высокомодульное стекловолокно, одностадийное	Vetrotex
DM-S-стекло - высокопрочное стекло по одностадийной технологии полностью соответствует стандартам и свойствам S-стекла	Owens Corning

Механические характеристики стекловолокон напрямую зависят от метода производства, химического состава стекла, температуры и окружающей среды. Самую большую прочность имеют непрерывные стекловолокна из бесщелочного и кварцевого магний алюмосиликатного стекла. Повышенное содержание щелочей в исходном стекле значительно снижает прочность стекловолокон.

Выбран стекловолокно E-стекловолокно, так как этот вариант обеспечивает необходимую прочность, имеет более высокую диэлектрическую постоянную, цена данного материала намного ниже, чем у остальных.

Описание стекло E.

Химический состав.

На сегодняшний день в мире волокна из E-стекол, на основе химической формулы $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--MgO}$.

Коммерческое стекловолокно марки E получают на основе системы $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--MgO--B}_2\text{O}_3$ или системы $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--B}_2\text{O}_3$. Продукты, полученные на основе последней системы, как правило, все-таки содержат небольшое количество оксида магния (до 0,6 масс. %), что связано с особенностями сырья, которое используют для получения стекол. Важно отметить, что точный состав стекловолокна E может отличаться друг от друга не только для разных производителей, но даже и для разных заводов одной компании. В E-стекловолокне содержится оксид кремния 59-61 %, алюминий – 12- 15 %, оксида кальция – 21-23 %. Содержание оксида магния в стекле варьируется в широких пределах. Для стекол, полученных на основе тройных систем, оно составляет менее 1%, и является следствием неоднородности сырья. В случае если в состав шихты входит доломит содержание оксида магния может достигать 3,5 %.

Свойства волокон на основе E-стекла.

Механические свойства обоих видов волокон на основе E-стекла почти одинаковы. Прочность на разрыв составляет 3100-3800 Мпа. Однако модуль упругости у волокон без оксида бора несколько выше (80-81 ГПа), чем у

обычных волокон (76-78 ГПа). Основным отличием стекловолокна марки Е без бора является более чем в 7 раз большая кислотостойкость (выдержка при комнатной температуре в течение 24 часов в 10% растворе серной кислоты). По своей кислотостойкости эти волокна приближаются к химически стойким волокнам на основе ECR стекла.

Плотность борсодержащих стеклянных волокон несколько ниже (2,55 г/см³) по сравнению со своим экологически чистым аналогом (2,62 г/см³). Плотность Е-стекла выше, чем у стекол других типов (за исключением ECR стекла). С увеличением содержания бора в таких стеклах уменьшается коэффициент преломления и коэффициент линейного расширения. Не содержащие бор Е-стекла имеют более высокую диэлектрическую постоянную, которая при комнатной температуре и частоте 1 МГц составляет 7. Поэтому борсодержащие волокна чаще используют при производстве электронных плат и в аэрокосмической промышленности. В широком производстве композитов эта разница не имеет такого критического значения.

Вал электродвигателя изготавливается из стали 35[10]. Характеристики ст.45 представлены в таблице 2.3.

Термообработка: Нормализация

Температураковки, °С: начала 1280, конца 750. Заготовки сечением до 800 мм охлаждаются на воздухе.

Твердость материала: $HВ 10^{-1} = 163$ Мпа

Температура критических точек: $A_{c1} = 730$, $A_{c3}(A_{cm}) = 810$, $A_{r3}(A_{rcm}) = 796$, $A_{r1} = 680$, $M_n = 360$

Свариваемость материала: ограниченно свариваемая. Способы сварки: РДС, АДС под флюсом и газовой защитой, ЭШС. Рекомендуется подогрев и последующая термообработка. КТС без ограничений.

Флокеночувствительность: не чувствительна.Э

Склонность к отпускной хрупкости: не склонна.

Обрабатываемость резанием: в горячекатанном состоянии при $HВ 144-156$ и $\sigma_B=510$ Мпа, $K_{об.ст}=1,3$

Таблица 2.5 – Электромагнитные свойства стали 2013

Сортамент	Размер	$P_{1.0/50}$	$P_{1.5/50}$	B_{1000}	B_{2500}	B_{5000}	B_{10000}	B_{30000}
	мм	Вт/кг	Вт/кг	А/м	А/м	А/м	А/м	А/м
Лист тонкий холоднокатан.	0.65	3.1	7	1.53	1.64	1.74	1.85	2.05
Лист тонкий холоднокатан.	0.5	2.5	5.6	1.54	1.65	1.75	1.85	2.05

Таблица 2.6 Свойства алюминиевой пудры ПАП-1.

Химический состав, %	
Активный алюминий, %, не менее	-
Примеси, %, не более	
Железо	0.5
Кремний	0.4
Медь	0.05
Марганец	0.01
Влага, не более	0.2
Жировые добавки	3.8
Гранулометрический состав (номера сеток по ГОСТ 6613)	
Остаток на сите, %, не более	
№ 008	-
№ 0056	0.3
№ 0045	0.5
Всплываемость, %, не менее	80

Таблица 2.3 – Электротехнический сталь марки «2013»

Т (Град)	ρ (кг/м ³)	R 10 ⁹ (Ом·м)
20	7850	140

2.2. Методы исследования

Проведены исследования на растяжение, трехточечный изгиб, сжатие, масса поглощение.

Определение степени массопоглощения после воздействия химических реагентов производится по методике ISO (Международной организации стандартизации пластических масс) и по ГОСТ 12020-72 (Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред) [11]. Образцы в виде кубиков размером 10×10×10 мм выдерживаются в течение 2 недель в нормальных условиях. После этого все образцы взвешиваются. Далее образцы полностью погружаются в рабочую среду (вода, масло техническое, бензин). Испытание должно длиться не менее 7 суток. Измерения производятся через 1 сутки с момента погружения, затем через 3 суток, 7 суток, 14 суток, 21 сутки, 28 суток, 42 суток, 2 месяца, 120 суток, 180 суток. Перед проведением контрольного взвешивания образцы извлечь из рабочей среды, протирать досуха, взвесить с точностью до 0,001 г и вновь поместить в агрессивную среду до следующего контрольного взвешивания.

Изменение веса (в %) в результате воздействия агрессивной среды вычислять по формуле:

$$m_t = \frac{M_t - M_0}{M_0} \cdot 100\% , \quad (2.1)$$

где M_0 – исходный вес образца, г;

M_t – масса образца после экспозиции в агрессивной среде в течение времени t .

За окончательный результат берётся средняя величина степени массопоглощения из 3-х значений, полученных при измерениях.

Определение массы компонентов полимерных композитов. Для измерения массы испытываемых компонентов образцов использовали весы марки CAS серии CBL (рисунок 4).



Рисунок 4 – Электронные весы марки CAS серии CBL

1 – металлический корпус; 2 – платформа из нержавеющей стали с отбортовкой; 3 – ветрозащитный колпак; 4 – измерительная чаша; 5 – дисплей)

Лабораторные весы серии CAS CBL предназначены для статических измерений с высокой. Принцип работы весов основан на электромагнитной компенсации, что обеспечивает быстрый отклик датчика при возникновении нагрузки, долговечность и высокую стабильность весов. Для предохранения от перегрузки предусмотрен графический указатель степени нагрузки весов. Весы серии CAS CBL имеют режим процентного взвешивания, счётный режим (в т. Ч. С вычетом массы тары), режим многократного вычета массы тары. При этом вводимая масса тары суммируется и сохраняется в памяти весов, а показания на индикаторе корректируются. Данный режим удобен при приготовлении многокомпонентных смесей. Основные технические характеристики весов представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Основные характеристики электронных весов CAS CBL

Дискретность отсчёта, г	0,001
Цена поверочного деления, г	0,01
Рекомендуемая юстировочная гиря	100÷150 г F2
Класс точности по ГОСТ 24104-2001	высокий (II)
Тип измерения	электромагнитная компенсация
Тип дисплея	жидкокристаллический, с подсветкой
Количество разрядов индикатора	7
Выборка массы тары	во всём диапазоне взвешивания
Предел взвешивания, г	220 – 320
Размеры рабочей платформы, мм	100 × 100
Габаритные размеры весов, мм	170 × 240 × 114
Диапазон рабочих температур, °С	от +5 до +40
Относительная влажность, %, не более	80
Интерфейс	RS-232C (IFB-102A)
Масса весов, кг	2,2

Испытания на предел прочности при изгибе.

Испытание проводится на разрывной машине с трехточечной схемой нагружения по ГОСТ 25.604-82 [12]. Схема нагружения, расстояния между точками нагружения и размеры образца представлены на рисунке 2.2.

Это испытание позволяет определить модуль упругости, модуль межслойного сдвига, прочность по нормальным напряжениям и прочность межслойного сдвига.

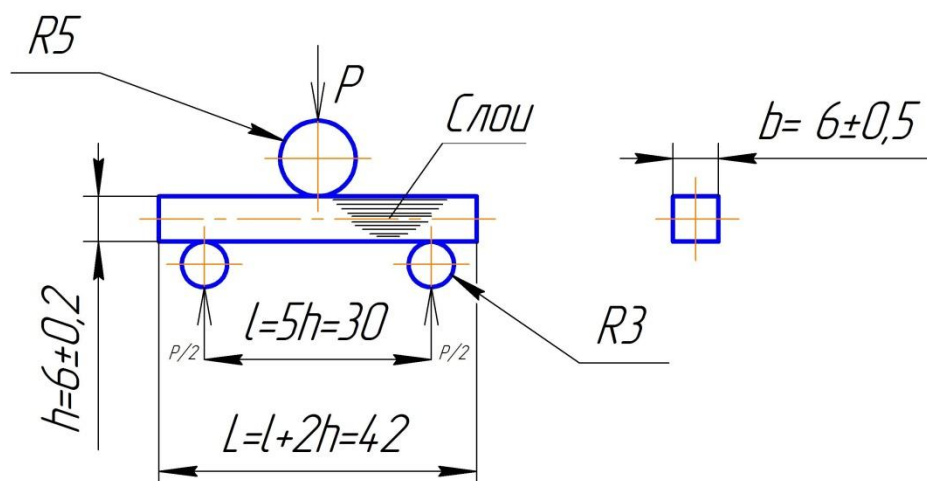


Рисунок 5 – Схема испытаний на трёхточечный изгиб.

Рассчитывая на жёсткость при изгибе элементы конструкции из композитных материалов, необходимо знать модуль упругости при изгибе. Для изотропных материалов модуль упругости при изгибе практически совпадает с продольным. Для слоистых композитных материалов модуль упругости при изгибе, как правило, меньше продольного модуля упругости. Причина в том, что прогиб при поперечном изгибе слоистого композита складывается из прогиба от изгибающего момента и прогиба, вызванного сдвиговыми деформациями от касательных межслойных напряжений. Поэтому определяя прогиб слоистого элемента при поперечном трёхточечном изгибе, необходимо использовать соответствующий модуль упругости. Модуль упругости при изгибе E_{ni} (Па), вычисляется по формуле 2.2:

$$E_{ni} = \frac{\Delta F l^3}{4bh^3 \Delta \omega} \quad (2.2)$$

Где ΔF – приращение нагрузки (Н);

l – расстояние между опорами (м);

b, h – ширина и высота образца (м);

$\Delta \omega$ – приращение прогиба в середине образца, соответствующее ΔF .

Предел прочности при поперечном трёхточечном изгибе вычисляют по формуле 2.3 и 2.4:

$$\sigma_{\text{пчи}} = \frac{M_u^{\text{max}}}{W_x} \quad (2.3)$$

Где $M_u^{\text{max}} = \frac{F_{\text{max}}l}{4}$ - максимальный изгибающий момент;

$W_x = \frac{bh^2}{6}$ - осевой момент сопротивления сечения образца.

$$\sigma_{\text{пчи}} = \frac{1,5F_{\text{max}}l}{bh^2} \quad (2.4)$$

Где F_{max} максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца (Н).

Испытание на прочность при растяжении [13].

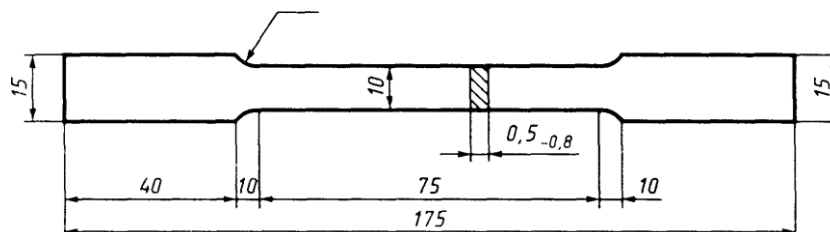
Испытания проводят на разрывных и универсальных испытательных машинах, обеспечивающих растяжение образца с заданной постоянной скоростью перемещения активного захвата и измерение нагрузки с погрешностью не более 1 % от измеряемой величины.

Захваты испытательной машины должны обеспечивать надежное крепление и точное центрирование образца (продольная ось образца должна совпадать с направлением действия растягивающей нагрузки). Для надежного крепления образца при испытании высокомодульных, высокопрочных композиционных материалов рекомендуется применять захваты с насечкой на рабочих поверхностях под углом $\pm 45^\circ$ с шагом 1 – 2 мм на длине 100 – 105 мм.

Для регистрации деформаций должны использоваться приборы, обеспечивающие измерение деформаций с погрешностью не более 1 % от предельного значения измеряемой величины. Могут быть использованы механические тензометры, тензопреобразователи сопротивления или другие приборы, прикрепление которых не создает дополнительных напряжений или деформаций и не оказывает влияние на определяемые характеристики.

Приборы для измерения геометрических размеров образца должны обеспечивать измерение с погрешностью не более $\pm 0,05$ мм, если измеряемые размеры меньше 10 мм, и $\pm 0,1$ мм, если измеряемые размеры больше или равны 10 мм.

Для испытаний однонаправленных композиционных материалов применяют образцы в виде полосы прямоугольного сечения с закрепленными на концах накладками (рисунок 6).



1 – накладка; 2 – образец

Рисунок 6 – образец для исследования на растяжение.

После проведения испытания вычисляется модуль упругости E . Модуль упругости вычисляется по формуле 2.5.

$$E = \sigma_0 / \varepsilon; \quad (2.5)$$

Где σ_0 – предел прочности при растяжении, ε – относительное удлинение.

Относительное удлинение находится по формуле 2.6.

$$\varepsilon = \Delta \ell / \ell \quad (2.6)$$

где $\Delta \ell$ - разница длин между до разрыва и после разрыва, ℓ - длина до разрыва.

Исследование предела прочности на сжатие.

Исследование на сжатие проводится по требованиям ГОСТ 4651-2014 [14]. Образец закрепляют в сжимающую машину. Образец сжимается вдоль его главной оси с постоянной скоростью до разрушения. Испытательная машина должна соответствовать ГОСТ 28840.

Требования к образцам. Образцы вырезают из однородных по толщине плит или других полуфабрикатов. Вырезку образцов проводят в направлениях главных осей ортотропии испытываемого материала. Способ и режим изготовления образцов предусматриваются в нормативно-технической документации на композиционные материалы.

Образцы должны иметь гладкую наружную поверхность без вздутий, сколов, трещин и других дефектов, заметных невооруженным глазом.

Шероховатость торцевых поверхностей образца должна соответствовать $Ra < 0,63$ мкм по ГОСТ 2789-73. Изменение толщины и ширины по длине образца должно быть не более 0,05 мм.

Для определения предела прочности при сжатии в направлении армирования однонаправленных композиционных материалов применяют образцы в виде полосы прямоугольного поперечного сечения 2 с закрепленными по концам накладками 7, рисунок 7.

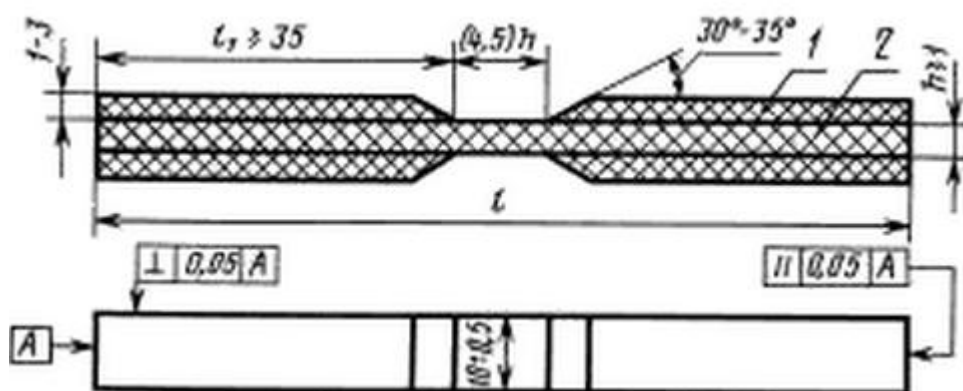


Рисунок 7 – образец для испытания на сжатие.

Предел прочности при сжатии (σ_b^c), Мпа, определяют по формуле

$$\sigma_b^c = \frac{F_{max}^c}{b \cdot h}$$

где F_{max}^c - наибольшая нагрузка, предшествующая разрушению образца, Н;
 $b \cdot h$ – площадь поперечного сечения образца, мм².

3 Модуль упругости при сжатии E^c , Мпа, определяют по формуле

$$E^c = \frac{\Delta F^c}{b \cdot h} \cdot \frac{l}{\Delta l} = \frac{\Delta F^c}{b \cdot h} \cdot \frac{1}{\Delta \varepsilon_{II}^c} =$$

где ΔF^c - приращение нагрузки, Н;

F^c

l - база тензометра, мм;

Δl - изменение базы тензометра (продольная деформация мерной базы) при

изменении нагрузки на ΔF^c , мм;

$\Delta \varepsilon_{II}^c = \frac{\Delta l}{l}$ изменение относительной продольной деформации рабочей части образца, измеряемое тензодатчиками сопротивления, при изменении нагрузки на ΔF^c .

Исследование на теплопроводность.

Испытания проводятся по методу определения теплопроводности материалов при средней температуре. Все испытания должны соответствовать ГОСТ 7076-87 [15].

Для испытания был взят электронный измеритель теплопроводности ИТП – МГ4.



Рисунок 8. Электронный измеритель теплопроводности ИТП-МГ4.

Сущность метода заключается в создании теплового потока, направленного перпендикулярно к наибольшим граням плоского образца определенной толщины, измерении плотности стационарного теплового потока и температур на противоположных гранях образца. Температура помещения, в котором проводятся испытания, должна быть 20 ± 2 С. Теплопроводность определяют на образцах, высушенных до постоянной массы при температуре 105 ± 5 С, если в нормативно-технической документации (НТД) на материал или изделие конкретного вида не указана другая температура. Образцы считаются высушенными до постоянной массы, если потеря их массы после повторного

высушивания в течении 0,5 часов не превышает 0,1%. Перед испытанием образцы необходимо выдержать не менее 1 часа при температуре помещения, в котором будут проводится испытания. Теплопроводность неорганических волокнистых материалов и изделий определяют с учетом деформации образцов при удельной нагрузке, предусмотренной НТД на материал (изделие конкретного вида). Образцы для определения теплопроводности изготавливают в виде пластины размером в плане 100x100мм или образца диска диаметром от 90 до 100мм, толщиной от 15 до 30мм. Отклонения размеров образцов в плане не должны превышать +/- 1мм. Образцы материалов и изделий с теплопроводностью менее 0,1 Вт/(мС) должны иметь толщину не более 20 мм. Разнотолщинность и отклонение от плоскости наибольших граней образца не должны превышать 0,5 мм. Образцы, имеющие разнотолщинность и неплоскостность более 0,5мм, шлифуют, а затем высушивают и взвешивают. Толщину образца измеряют штангенциркулем с погрешностью не более 0,1мм в четырех углах на расстоянии 50мм от вершины угла и посередине каждой стороны. За толщину образца принимают среднее арифметическое значение результатов.

2.3. Статистическая обработка экспериментальных данных.

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась по методике, которая заключается в определении числа образцов (n), необходимых для получения результатов испытаний с заданной степенью точности (P) . При этом определяется также коэффициент изменчивости исследуемого признака или вариационный коэффициент (V).

Для установления достоверной характеристики вычислялись среднеарифметическое значение (M) из совокупности всех наблюдений, а также среднеквадратическое отклонение (σ), определяющие пределы колебаний исследуемого показателя:

$$M = \frac{\sum y_{cp}}{n} \quad (2.7)$$

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum \chi^2}{n-1}} \quad (2.8)$$

где y – показатель; $\sum y$ – сумма отдельных измерений; $\bar{\chi} = y - M$ – отклонение каждого варианта от среднеарифметического; χ^2 – сумма квадратов.

Необходимый объем выборки, обеспечивающий требуемую точность полученных статистических характеристик при заданном уровне вероятности:

$$n = \frac{\sigma^2 \cdot t^2}{\Delta_y^2}, \quad (2.9)$$

где $t = \frac{\bar{\chi}}{\sigma}$ – стандартизированное отклонение; Δ_y – предельная ошибка выборки.

Средняя ошибка выборки:

$$m = \frac{\Delta_y}{t} = \frac{\pm \sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.10)$$

Вариационный коэффициент:

$$V = \frac{\pm \sigma}{M} \cdot 100\%. \quad (2.11)$$

Обработка кинетических зависимостей методом линейной регрессии. Статическая обработка экспериментальных данных, полученных при анализе кинематических зависимостей, проводилась методом линейной регрессии, описанным в работах.

Устанавливалась статистическая зависимость между случайными величинами x и y , в данной работе – время и массопоглощение образцов из

полимерных наполненных КМ. Если k_{ix} обозначает частоту появления пары значений x_i, y_j , то выражения:

$$k_{ix} = \sum_j k_{ij} \text{ и } k_{yj} = \sum_i k_{ij}, \quad (2.12)$$

представляют частоту появления соответственно значения x_i и значения y_j . Полное число наблюдений равно:

$$\sum_i k_{ix} = \sum_j k_{yj} = \sum_{ij} k_{ij} = n. \quad (2.13)$$

Среднее значение и дисперсия случайных величин x и y определялись по формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i k_{ix} x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_j k_{yj} y_j, \quad (2.14)$$

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_i k_{ix} (x_i - \bar{x})^2, \quad S_y^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_j k_{yj} (y_j - \bar{y})^2. \quad (2.15)$$

Коэффициент ковариации, или корреляционный момент, распределения случайных величин находился по следующей формуле:

$$S_{xy} = \frac{\sum_{ij} (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{n-1}. \quad (2.16)$$

Степень линейности зависимости между двумя случайными величинами x и y характеризуется коэффициентом корреляции:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x \cdot S_y} = \frac{[k_{ij} (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})]}{\sqrt{[k_{ix} (x_i - \bar{x})^2][k_{yj} (y_j - \bar{y})^2]}}. \quad (2.17)$$

Его величина ограничена пределами ($-1 \leq r \leq 1$). В случае $|r|=1$, все измеренные значения x_i, y_j лежат на одной прямой, называемой прямой регрессии. Если $|r| < 1$ и выполняется неравенство:

$$|t| = \frac{|r|}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2} > t_\alpha, \quad (2.18)$$

то с вероятностью ошибки α можно считать, что случайные величины x и y связаны линейной зависимостью:

$$y = a + bx. \quad (2.19)$$

Находится величина $f = n - 2$.

Таблица 2.2 – t-распределение

f	P				
	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
1	6,31	12,7	31,82	63,66	636,92
2	2,92	4,30	6,70	9,93	31,60
3	2,35	3,18	4,54	5,84	12,94
4	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
5	2,02	2,57	3,37	4,03	6,86
6	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
7	1,90	2,37	3,00	3,50	5,40
8	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
9	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
11	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
20	1,72	2,09	2,53	2,85	3,83
25	1,71	2,06	2,49	2,79	3,72
30	1,70	2,04	2,46	2,75	3,65
40	1,68	2,02	2,42	2,70	3,55
60	1,67	2,00	2,39	2,66	3,46
120	1,66	1,98	2,36	2,62	3,37
∞	1,65	1,96	2,33	2,58	3,29

По вычисленным значениям $|t|$ и f находится из таблицы 2.2 такое табличное значение t_α , наиболее близкое к величине $|t|$, чтобы выполнялось условие $|t| > t_\alpha$. С учетом выполнения условия $|t| > t_\alpha$ определяется величина надежности P , с которой расчетные значения соответствуют опытным данным.

3. Исследование физико-механических и технических свойств материалов, применяемых в конструкции электродвигателя.

3.1. Исследование массопоглощение

Исследования проведены до 21 суток. Результаты измерений занесены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Измерения массы образца

Количество суток	Масса образца
0	11,03
1	11,03
3	11,07
7	11,46
14	12,01
21	12,04

Вычисляется массопоглощение изделия с помощью вышеприведённой формулы.

$$M_7 = ((11,46 - 11,03) / 11,03) * 100\% = 3,89\%$$

$$m_{14} = ((12,01 - 11,03) / 11,03) * 100\% = 8,88\%$$

$$m_{21} = ((12,04 - 11,03) / 11,03) * 100\% = 9,16\%$$

$$m_{t,ср.} = (3,89 + 8,88 + 9,16) / 3 = 7,31\%$$

Таким образом, среднее массопоглощение материала составляет 7,31%. Для более точного анализа образец также взвешивался каждый день. Результаты приведены в рисунке 9. Исходя из данных приведённых в графике, следует отметить, что резкое массопоглощение начинается в четвёртые сутки и продолжается до четырнадцатых суток. После четырнадцатых суток массопоглощение замедляется и стабилизируется.

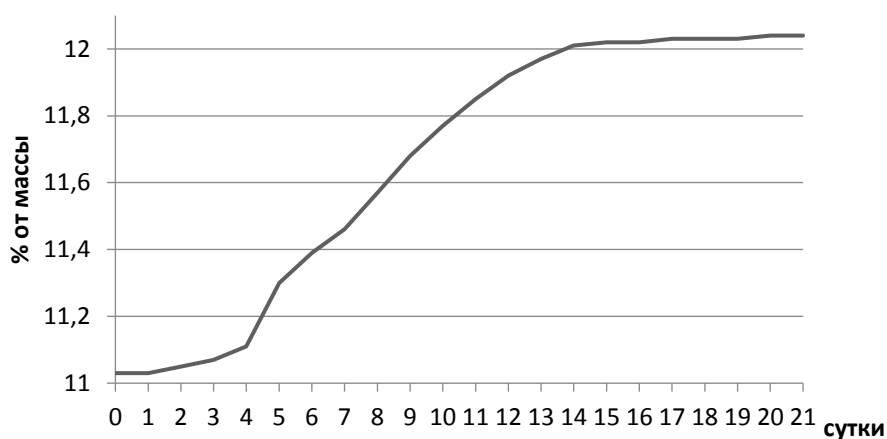


Рисунок 9 – График масса поглощения каждые сутки

Исходя из полученных данных. Если электродвигатель, используемый в щётках, каждые пол сутки будет сушиться, то ни какого массопоглощение не произойдёт или произойдёт в очень маленьких объёмах.

3.2 Исследование предела прочности при трёхточечном изгибе

Проведены исследования на предел прочности при трёхточечным изгибе. Исследование образцов соответствует ГОСТ 25.604-82. Подготовлено три образца с одинаковыми размерами. Результаты измерений занесены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2. – Результаты измерений при трёхточечном изгибе.

№	σ_B , МПа	Fmax, Н
1	320	1377,6
2	322	1372,6
3	321	1372,6

Из результатов измерений видно, что предел прочности на изгиб 320 Мпа.

3.3 Исследование предела прочности при сжатии

Испытания на прочность проводится по ГОСТ 25.602-80, методом механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей. Метод состоит в кратковременном испытании образцов из композиционного материала на сжатие с постоянной скоростью деформирования, при котором определяют:

предел прочности при сжатии σ_B^c (напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца), Мпа;

модуль упругости при сжатии E^c – отношение напряжения к соответствующей относительной деформации при сжатии образца в пределах начального линейного участка диаграммы деформирования, Мпа;

коэффициент Пуассона ν^c – отношение поперечного относительного удлинения к продольному относительному укорочению образца при сжатии в пределах начального линейного участка диаграммы деформирования. Исходя из результатов измерений за прочность материала на сжатие взято минимальное значение из всех полученных 286 Мпа на см².

Таблица 3.3 – Результаты исследования на сжатие.

№	σ_B , Мпа	Fmax, Н
1	287	1377,6
2	286	1372,6
3	286	1372,6

3.4. Исследование предела прочности при растяжении.

Проведены исследования материала на предел прочности на растяжение. Для проведения исследования изготовлены три образца по требованиям ГОСТ 14236-81. Размеры всех образцов одинаковые. Длина 250 мм, ширина 12 мм, толщина 4 мм. При исследовании записывались: сила

предела прочности и удлинение образца. Результаты измерений занесены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4.

№	σ_0 , Мпа	ℓ_2 , мм
1	290	25,2
2	292	25,4
3	291	25,3

Из всех трёх значений выбрано минимальное значение 290 Мпа. Вычисляется относительное удлинение и модуль упругости. Результаты измерений и вычислений занесены в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 – результаты исследований.

Σ_0 , Мпа	ε , %	Е, Гпа
290	2	14,3

3.5. Исследование на теплопроводность.

Исследовано металлонаполненный композитный материал, состоящий из полиэфирной смолы и частиц железа. Целью исследования: получение материала с высокой теплопроводностью и нужной прочности. Исследования теплопроводности проводили на электронном измерителе ИТП – МГ4. Также каждый материал проходил испытания на разрушение или не разрушение под действием сил на изгиб и сжатие под определёнными усилиями. Результаты экспериментов занесены в таблицу 3.6 и, для наглядной демонстрации, по зависимости теплопроводности от соотношения массы смолы и массы железа построен график – рисунок 10.

Таблица 3.6 – Результаты экспериментов металлонаполненного композитного статора.

№	$m_{ж}/m_c$	Теплопроводность Вт/м*°С	Примечание
1	40/60	0,296	Разрушился
2	50/50	3,486	Разрушился
3	60/40	7,614	Не разрушился
4	70/30	15,308	Не разрушился
5	80/20	24,661	Не разрушился
6	90/10	35,083	Разрушился
7	95/5	40,948	Разрушился

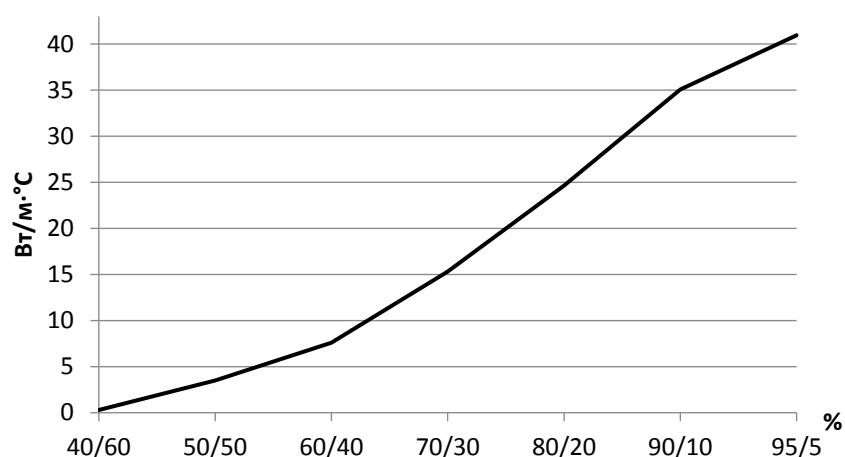


Рисунок 10 – Теплопроводность металлонаполненного композита при разных соотношения составляющих.

Таким образом, выбрано соотношение полиэфирной смолы и железа от общей массы 80 к 20 частям. Данный материал будет использован в разработке бобины.

Исследование свойств композитного материала: эпоксидная смола наполненная алюминиевым порошком.

Необходимо провести исследование материала на теплопроводность по ГОСТ 7076-99 «Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме» [12], для выявления теплопроводности данного композитного материала. Но так как изделие является сложной формы и состоит в стыке с бобышками, которые тоже выделяют тепло, рассчитать не возможно. Поэтому проведены натурные испытания готовой детали «обойма статора» из алюминиево-наполненного композитного материала.

Заформованы изделия, состоящие из эпоксидной смолы и алюминиевого порошка со максимальным размером частиц 10 мкм, различных вариаций:

- 1) 40% смолы и 60% наполнителя;
- 2) 30% смолы и 70% наполнителя;
- 3) 20% смолы и 80% наполнителя;
- 4) 10% смолы и 90% наполнителя.

Исследованы прочностные свойства статора (рисунок 11 и 12).

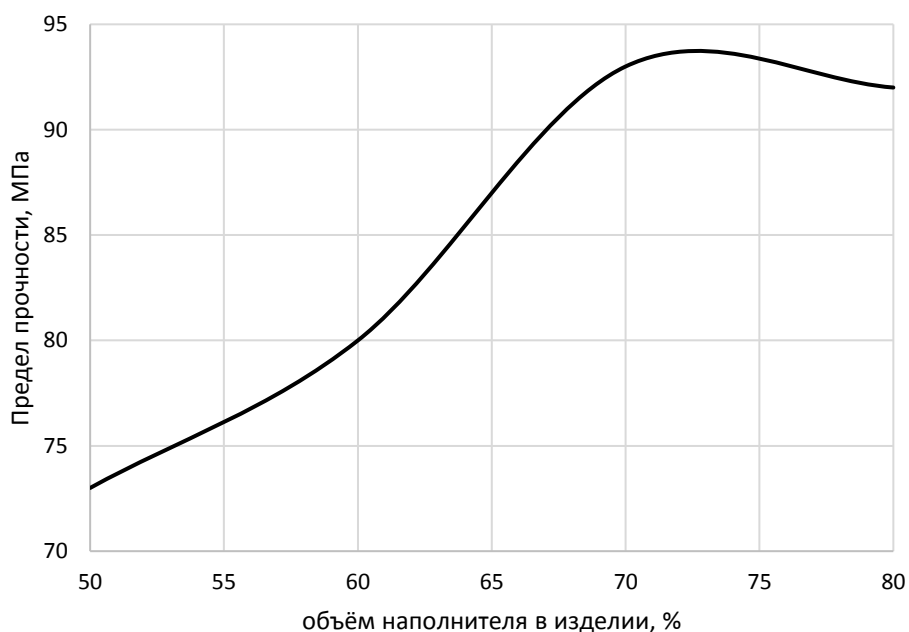


Рисунок 11 – График зависимостей прочностных характеристик от объема наполнителя

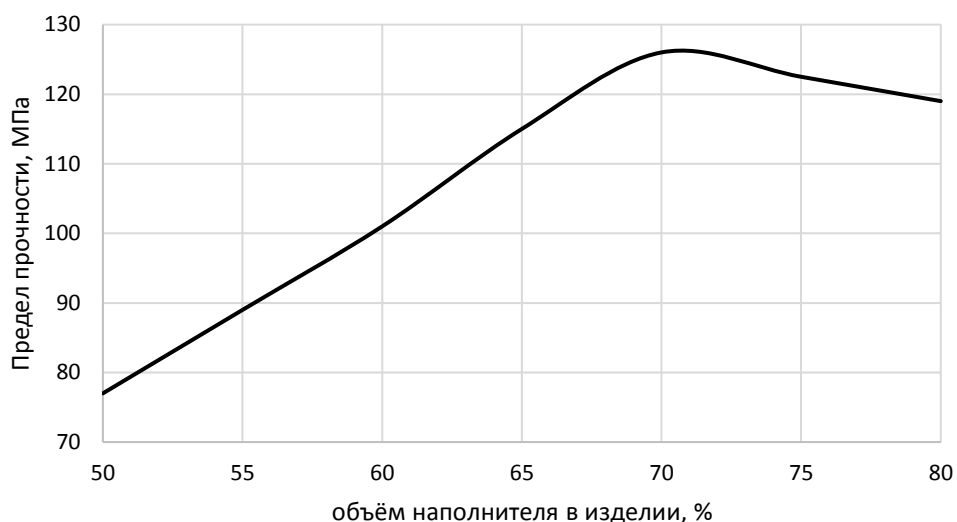


Рисунок 12– График зависимостей прочностных характеристик от объема наполнителя.

Из графика следует, что максимальные прочностные характеристики достигаются при соотношении 72% наполнителя и 18% эпоксидной смолы. Определена зависимость максимальной температуры от состава изделия (Рисунок13).

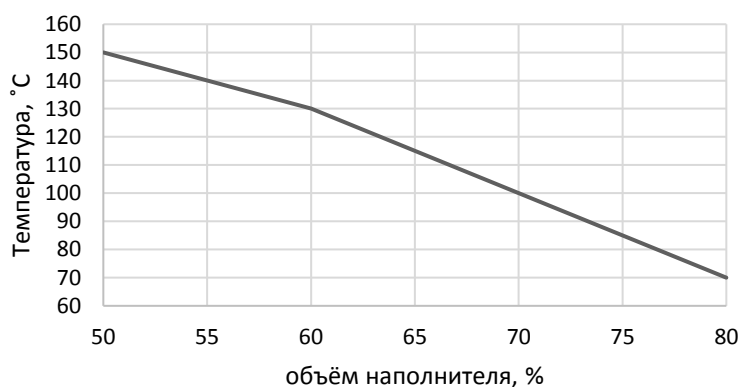


Рисунок 13- Зависимость максимального нагрева от объема наполнителя

При соотношении 72% наполнителя и 18% эпоксидной смолы изделие будет нагреваться до 96°C, что превышает максимально допустимую температуру на 26 °C.

Для увеличения теплоотдачи разработан новый структурированный материал без изменения химического состава. Предполагается, если в процессе полимеризации эпоксидной смолы наполненной алюминиевой пудрой воздействовать высокочастотным электромагнитным полем, то частицы алюминия будут структурироваться и приближаться друг к другу. Необходимыми условиями электромагнитного поля является его однонаправленность, низкая индуктивность и частоты от 1 МГц. При высоких колебаниях одновременно образуются два эффекта: электромагнитное притяжение и вибрация наполнителя. За счёт притяжения все частицы притягиваются друг-другу, тем самым уменьшается слой смолы между частицами. Также вибрация улучшает пропитывание смолы в затруднённых участках. Частицы алюминия под воздействием этих двух сил очень плотно прижимаются.

Процесс полимеризации осуществлялся при комнатной температуре и воздействии электромагнитного поля частотой 10 МГц. При этом замечено стремление алюминиевых частиц к центральной оси электромагнитного поля и вытеснение смолы от центра. Деталь извлечена из формы для литья. При исследовании органолептическим методом замечена, что по центру изделия плотность наполнителя до двух раз больше чем в окраинах. Из чего следует что теплопроводность будет неравномерным, максимум теплоотдача будет по центру. Деталь вмонтирована и испытана на нагрев при работающем двигателе. Определена максимальная температура нагрева статора – 72°C. Реализуемый метод формовки даёт существенно увеличение теплопроводности изделия без изменения его объёма и химического состава.

Исследования структуры материала в разрезе выявили связанную слоистую структуру. Слои расположены параллельно к оси электромагнитного поля. Ближе к центру слои более плотно прилегают друг другу, а по краю – менее плотно. Каждый слой состоит из отдельных мелких частиц, залитые тонким слоем смолы. Выявлено, что у структурированного материала теплопроводность больше. При испытаниях на прочность,

центральные части дают большую прочность, чем окраине. Также предел прочности при сжатии стал больше – 128 МПа, на растяжение не изменилось.

Для выявления наилучшей консистенции эпоксидной смолы и алюминиевого наполнителя при данном методе формовки, изготовлено 5 вариантов изделия с разным объёмом наполнителя:

- 1) 70/30;
- 2) 75/25;
- 3) 80/20;
- 4) 85/15;
- 5) 90/10.

Результаты представлены на рисунках 14 и 15.

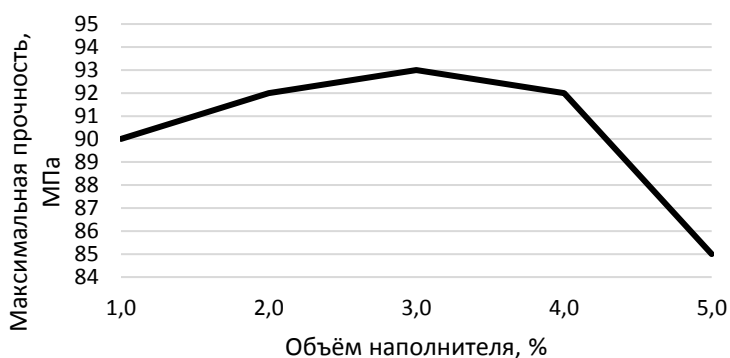


Рисунок 14 – предел прочности на растяжение в зависимости от объёма наполнителя

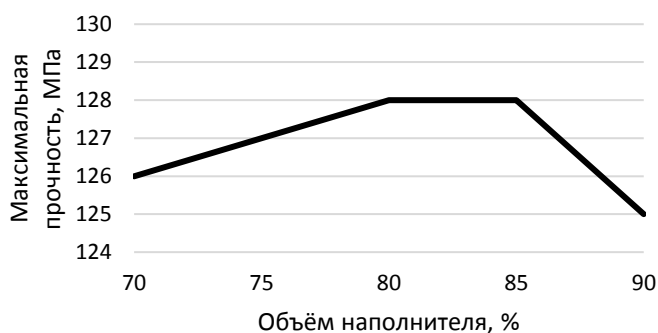


Рисунок 15 – предел прочности на сжатие в зависимости от объёма наполнителя

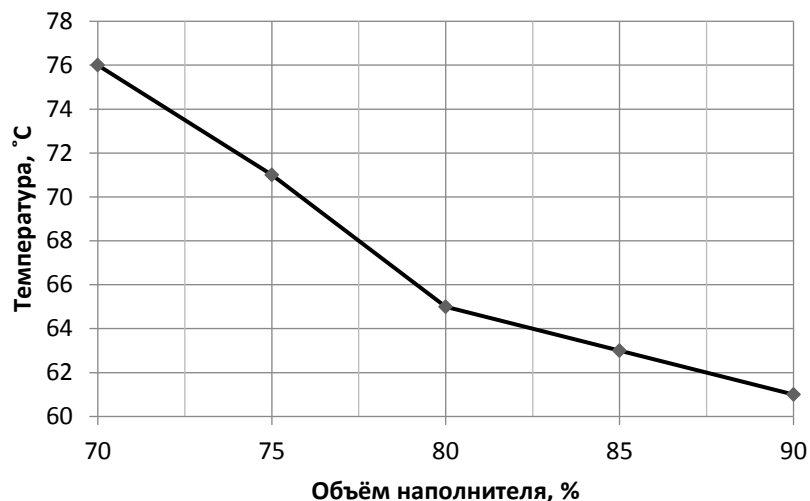


Рисунок 16– Максимальный нагрев в зависимости от объёма наполнителя.

Таким образом исходя из графиков следует, что для изделия «статор» наиболее целесообразно будет использовать соотношение эпоксидной смолы и алюминиевого наполнителя в соотношениях 20/80, то есть $\frac{1}{4}$. Также проведено исследование по ГОСТ 7076-99 на теплопроводность, равняется 176 Вт/(К·м).

Заключение по 3 главе.

Для наиболее точного результата исследованы материалы на предел прочности при растяжении и сжатии, химстойкость, теплопроводность. Разработаны две новые композитные материалы, которые ранее также не применялись в строении электродвигателей. Все полученные данные будут использованы при расчёте размеров и форм деталей гибридного электродвигателя.

4. Разработка элементов конструкции гибридного электродвигателя из композитных материалов

4.1. Техническое задание на конструкцию гибридного электродвигателя.

Гибридный электродвигатель совмещает в себе принципы работы шаговых и асинхронных двигателей. За счёт чего данный тип двигателя прост в эксплуатации как асинхронный двигатель, но такой же экономичный как шаговый двигатель. Для увеличения связи магнитных полей и улучшения охлаждения выбран аксиальный тип расположения элементов двигателя (Рис 17).

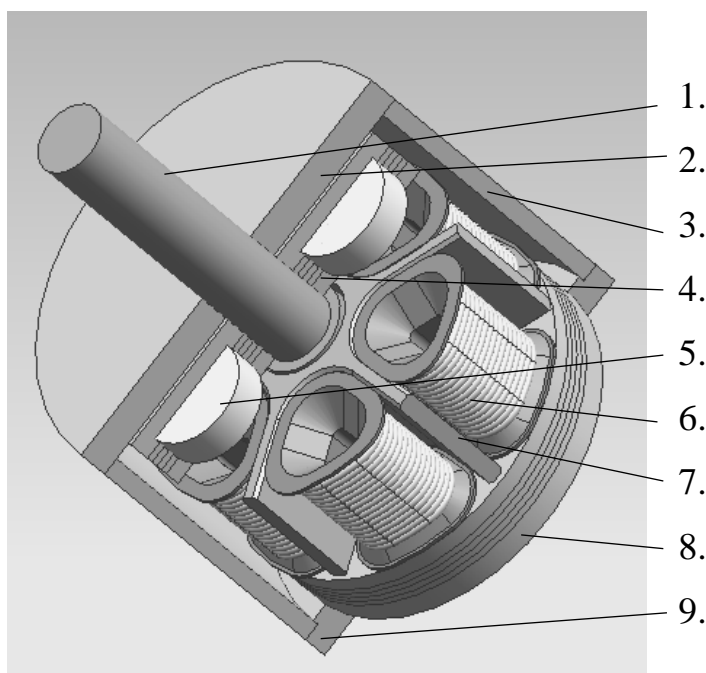


Рисунок 17 – Частичный разрез гибридного электродвигателя:

1) Вал, сталь 35, ГОСТ 10702-78; 2) Крышка «1», стеклопластик, ГОСТ 8865-93; 3) Корпус стеклопластик, ГОСТ 8865-93; 4) Диск ротора «1» в разрезе; 5) Постоянный магнит, ГОСТ 21559-76; 6) Катушка с обмоткой; 7) Обойма статора; 8) Диск ротора «2»; 9) Крышка «2», стеклопластик, ГОСТ 8865-93.

Технические требования

Тип электродвигателя – гибридный, однофазный

Мощность номинальная - 700 Вт.

Напряжение номинальное – 220 В.

Ток номинальный, не более – 3,18 А.

Частота вращения – 3000 об/мин.

Частота - 50Гц.

Схема соединений - Δ .

Тип пуска - прямой.

Режим работы- S1.

Направление вращения - правое и левое.

Тип охлаждения - самовентилируемый (IC411).

Диапазон рабочих температур от -20 °С до +40 °С

Степень защиты - IP-55.

КПД- не менее 92,0%.

Исполнение электродвигателя – нормальное.

Габаритные размеры - см. Приложение МД 1. 22.04.01. 18. 001.00.00 СБ

Катушки, как и во всех двигателях, создают вращающееся магнитное поле. Но дальнейшее распространение электромагнитных полей отличается от всех известных электродвигателей. Во всех электродвигателях ротор либо создаёт противоборствующее магнитное поле, либо наоборот – притягивающее. А в гибридном электродвигателе, ротор одновременно имеет разные участки магнитных полей. Также в роторе использован эффект резонанса электромагнитных полей между слоями дисков ротора. При работе электродвигателя возникают сложные взаимоотношения электромагнитных полей катушек и дисков ротора с эффектом резонанса и постоянным магнитным полем постоянных неодимовых магнитов. При этом вдоль каждого диска происходит различные микро вибрационные нагрузки. Направления микро вибраций могут быть в самых различных направлениях внутри каждого

диска и временами могут не совпадать с вибрациями соседних дисков, но временами могут и совпадать. Что усложняет расчёт прочностных характеристик роторов гибридного электродвигателя. В данном типе электродвигателя использование металлических корпусных деталей, приводит к исчезновению эффекта резонанса магнитного поля внутри ротора, что уменьшает КПД электродвигателя. Поэтому весь корпус электродвигателя изготовлен из неметаллических и непроводящих электрический ток материалов.

4.2. Разработка статора электродвигателя

Наиболее сложным элементом конструкции является статор, требующий эффективного охлаждения, возможности работы при высоких значениях магнитной индукции и частоты, высоких прочностных характеристик, высокую ремонтпригодность, защиту от коротких замыканий с корпусом. В результате поисковых исследований выявлено, что наиболее эффективным материалом является терморезистивные полимеры. Проведены натурные испытания различных вариаций проектируемого двигателя.

Первый прототип статора состоит из катушек из медной проволоки и эпоксидной смолы без добавления армирующих элементов. При натурных испытаниях выявлена высокая гидроизоляция конструкции статора. Недостатками являются:

- высокая температура обмоток статора (свыше 187°C), значительно превышающую максимально допустимую температуру эксплуатации изделий из эпоксидных смол (не более 70°C);
- уменьшение адгезии на границе раздела между медной обмоткой и эпоксидной смолой. Вследствие этого уменьшение прочности конструкции;
- низкая плотность магнитного поля из-за отсутствия ферритовых (намагничивающихся) материалов;
- не ремонтпригодность.

Для улучшения охлаждения статора изготовлены дополнительные отверстия (рис.18). В результате проведенных экспериментальных исследований выявлено значительный нагрев статора двигателя при работе под нагрузкой (до 180 °С).



Рисунок 18 – статор со сквозными отверстиями охлаждения.

Для улучшения ремонтпригодности двигателя, статор разбита на два типа составляющих (Рис. 19):

- обойма бобины;
- бобина для катушки.

Конструкция помещается во внутрь корпуса цилиндрической формы, который фиксирует бабину с катушками с внешней стороны.

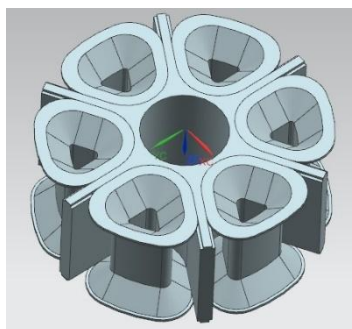


Рисунок 19 – статор гибридного электродвигателя.

Данный тип конструкции увеличил ремонтпригодность. В

электродвигателях статор собирается из листовой электротехнической стали марок Э42, Э43, Э43А, для уменьшения образования токов Фуко, от которых нагреваются детали. Но использование сложных геометрических форм (каждый элемент в отдельности из рисунка 2) исключает возможность использования сборной конструкции из листов. Так как при этом отдельные части бобышек, деталь для наматывания катушек, не выдерживают прочностные характеристики и начинают расслаиваться.

Во время работы двигателя все элементы двигателя подвергаются нагреву от 45°С до 85°С. Также на каждый элемент воздействует своя силы растяжения, сжатия и кручения.

Бобина катушки испытывает переменные нагрузки на растяжение и сжатие. Также греется изнутри от переменного магнитного поля и от тепла катушек намотанных на него.

Обойма статора фиксирует бобины на месте, при этом испытывает нагрузки на сжатие и изгиб. Тепловая нагрузка, только передача тепла от бобин и катушек.

Диски ротора работают на изгиб и сжатие. При индуцировании электромагнитных полей на дисках, идёт выделение тепла до 60°С.

В крышках и корпусе двигателя возникают сложные силы, но не идёт внутреннее выделение тепла.

4.2.1. Разработка обоймы статора.

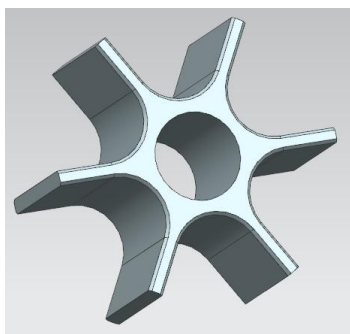


Рисунок 20 – обойма статора.

Основные требования обойме статора это фиксирование катушек на позициях и высокая теплопроводность. Габаритные размеры в приложении МД 1. 22.04.01. 18. 001.03.00 Следовательно, статор должен иметь высокие прочностные характеристики, так как при работе электродвигателя катушки будут создавать силу вращения. Данная сила в основном воздействует на обойму как сила сжатия, то есть от обоймы требуется высокая прочность на сжатие. Поэтому, решено изготавливать обойму из дисперсно-наполненного композитного материала.

После получения данных о материале проведён расчёт на прочность в программе SiemensNX 8.5 методом конечных элементов, так как геометрически сложные формы не позволяют сделать расчёт ручным методом.

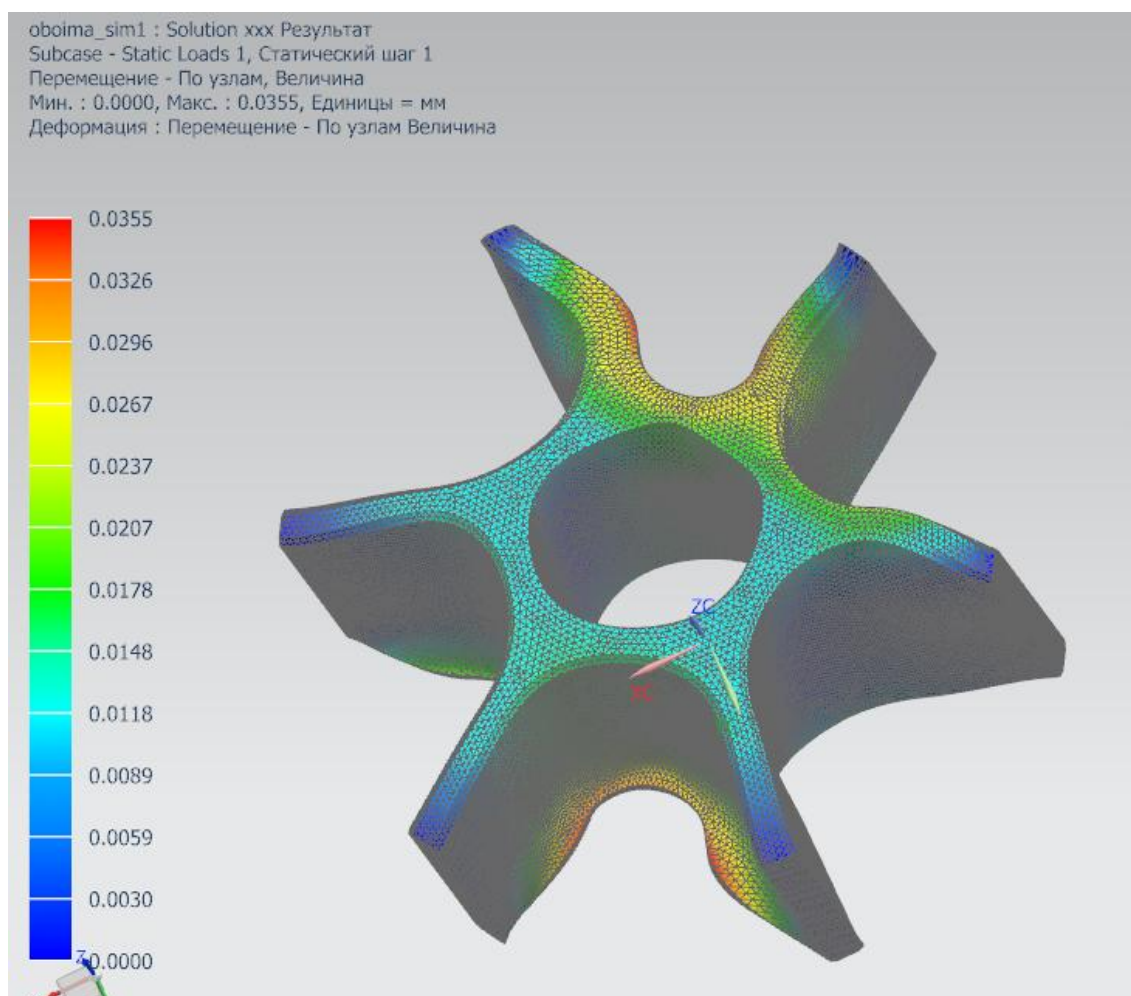


Рисунок 21 – Симуляция натурных испытаний в программе NX 8.5

Из симуляции расчёта на прочность понятно, что деталь выдерживает нагрузки и не требует изменений

4.2.2. Разработка бобины катушки.

Бобина катушки - это деталь, на которую, в нашей случаи, наматывается эмалированная проволока и исполняющая роль статора. Основные требования к бобине в гибридном электродвигателе:

- легкое перемагничиваемость;
- высокая прочность;
- недопустить залипание магнитов над катушкой;
- высокая теплопроводность.

В гибридном электродвигателе одна из проблем залипание магнитов над катушками. При запуске магнит находится над катушкой, так как внутри катушки стоит металлическая бабина. А уменьшение объёма металла приводит к перегреву обмотки. В ходе исследований обнаружены условия, при которых железо и без подачи тока, и без остаточных магнетизмов, может отталкиваться от магнита на некоторое расстояние.

Учитывая все требования и новый эффект разработан 3D модель бобины обмотки(рис.22) чертёж в приложении МД 1. 22.04.01. 18. 001.03.02.

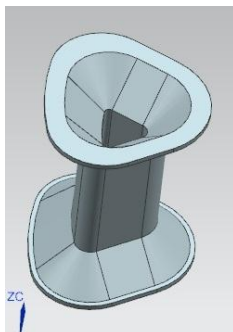


Рисунок 22 – 3D модель бобины.

В двигателестроении детали данного типа собирают из листов, накладывая друг на друга скрепляя с полиэфирным или эпоксидным смолой. Но конструкция оказалась конструктивно очень сложной из-за сложных геометрических форм и требованиям работы магнитных полей. Поэтому принято решение разработка дисперснонаполненного композитного материала. Матрицей композитного материала, которая даст монолитность конструкции, выбрана полиэфирная смола марки “Norsodyne H 44173”. А наполнителем, которая возьмёт на себя электротехнические свойства и улучшит свойства матрицы на сжатие, выступит порошок электротехнической стали.

Проведены расчёты на прочность в CADсистемеSolidWorksи выведены в виде отчёта.

Имя	Тип	Мин	Макс
Напряжение1	VON:	1.979e+001N/m^2	3.578e+003N/m^2
	Напряжение	Узел: 6778	Узел: 13425
	VonMises		

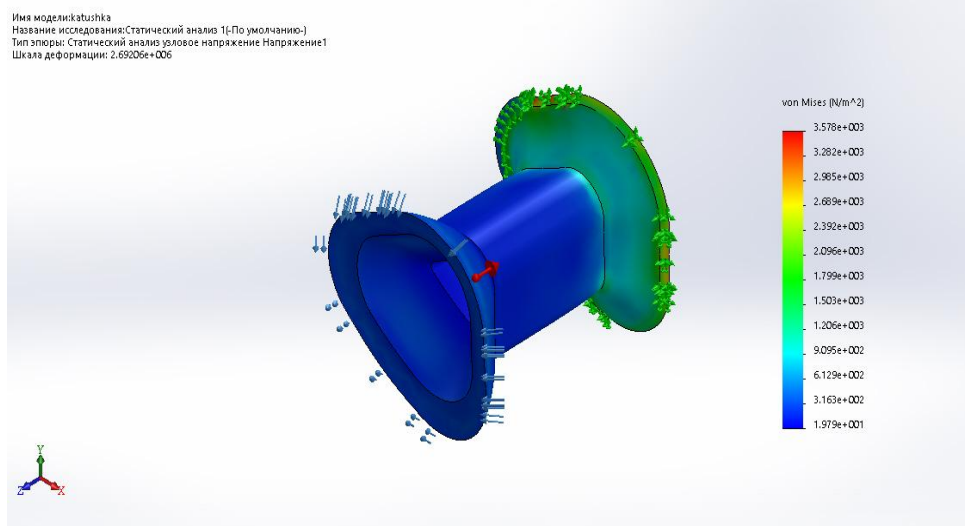


Рисунок 23– Бобина-Статический анализ –Напряжение

Имя	Тип	Мин	Макс
Перемещение1	URES: Результирующее перемещение	0.000e+000mm Узел: 6	1.503e- 006mm Узел: 5909

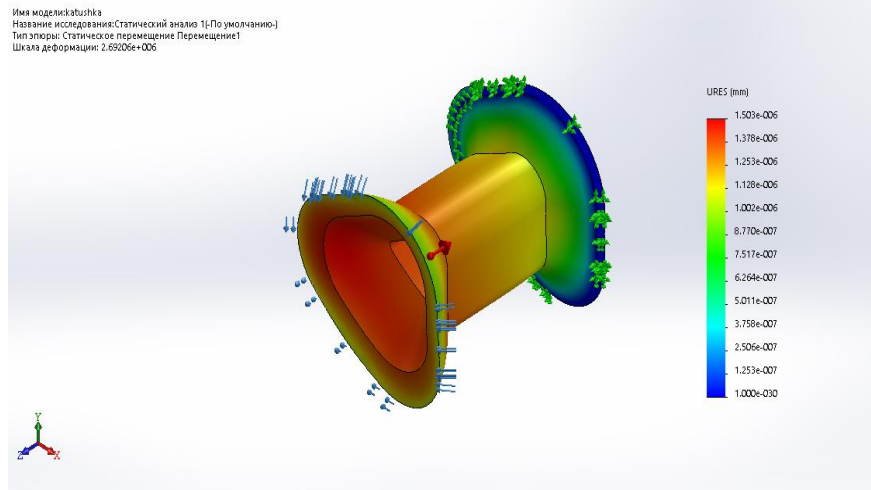


Рисунок 24– Бобина –Статический анализ –Перемещение

Имя	Тип	Мин	Макс
Деформация1	ESTRN: Эквивалентная деформация	7.657e-010 Элемент: 3769	1.107e-007 Элемент: 4781

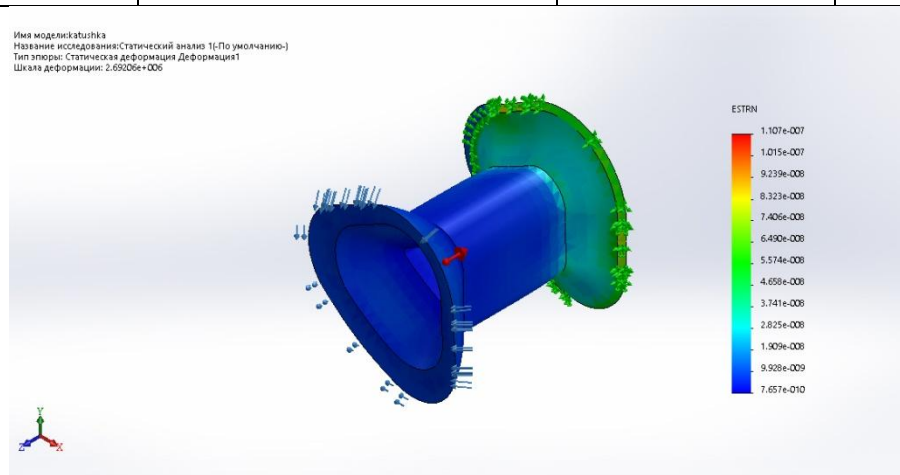


Рисунок 25– Бобина –Статический анализ –Деформация

Производство порошка электротехнической стали отсутствует. После исследований зависимость электромагнитных свойств, выяснено, что

наилучшие показатели дают порошки удлинённой эллипсоидной формы. Снимок шлифа порошка увеличенный в 200 раз показан на рисунке 26.

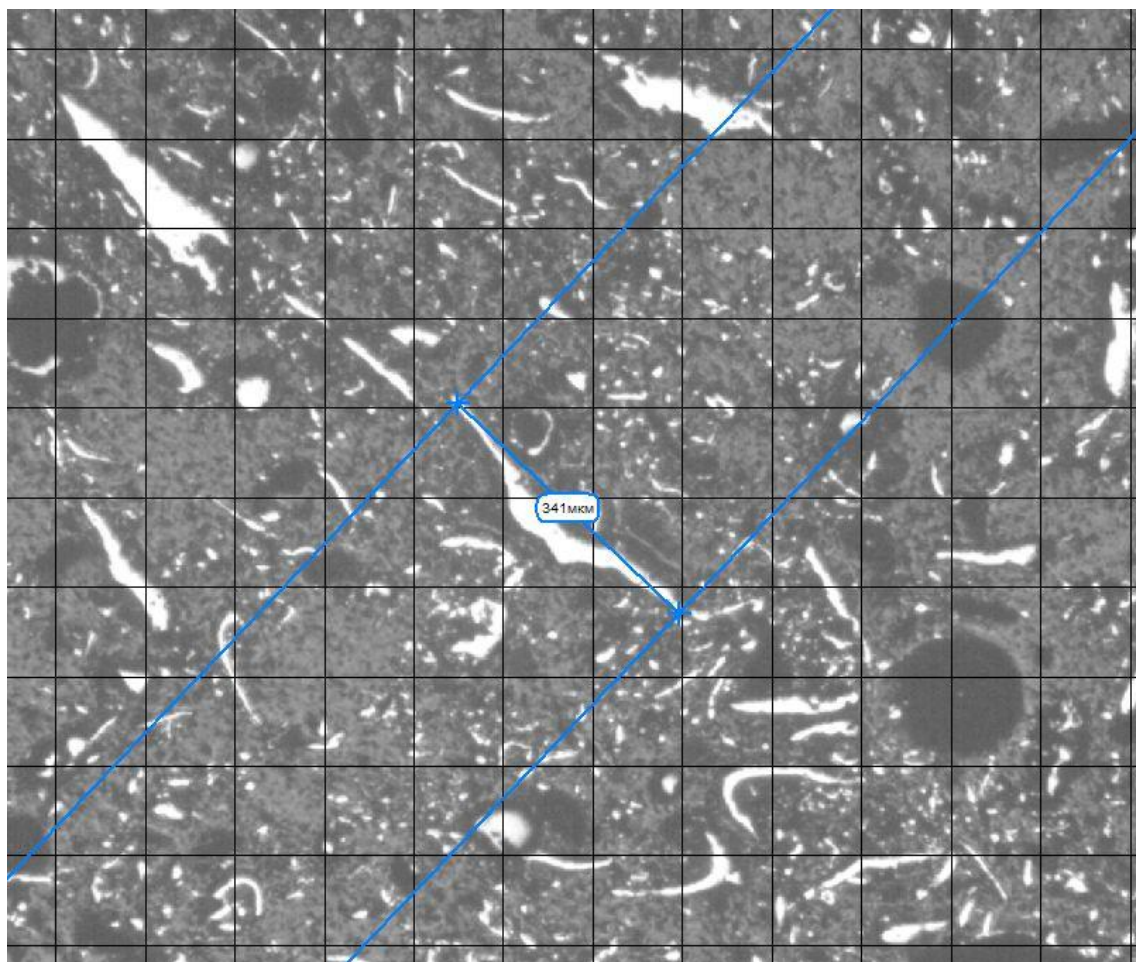


Рис.26 – Шлиф порошка под микроскопом.

Исследованы формы и размеры частиц при различных способах измельчения:

- лазером;
- плазмой;
- дробилкой.

Но ни одна из них не дала вытянутые формы. Для получения порошка нужных форм, разработана конструкция для измельчения стали (Рис.27).

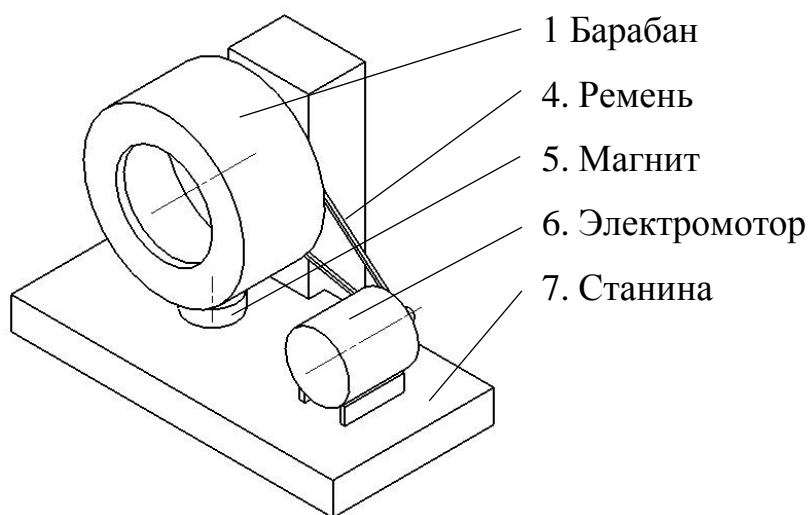


Рисунок 27 – Конструкция для измельчения стали.

Во внутрь барабана наполняется лом электротехнической стали. Двигатель через ременную передачу вращает барабан, внутри которого находятся материал для измельчения. Сам барабан сделан из стекла, на внутренние стенки склеена наждачная бумага размером зернистости Р80. Снизу барабана магнит притягивает измельчаемый материал к себе, тем самым прижимает к стенке барабана. При вращении, наждачная бумага нарезает вытянутые формы. Размер частиц наполнителя в длину получаются до 300 мкн.

Так как деталь работает на растяжение, частицы наполнителя должны располагаться вдоль детали. Также направление магнитных полей протекают вдоль детали, что тоже требует направление частиц вдоль бобышки (Рис 28).

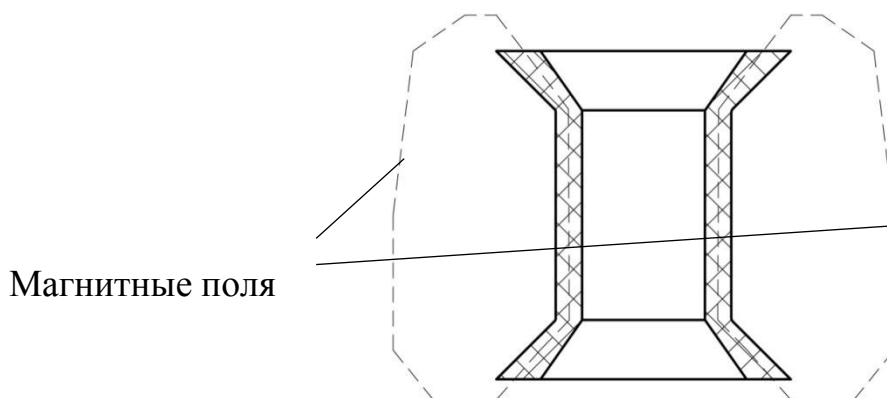


Рисунок 28 – Схематичное отображение направление магнитных полей.

Такое конструкционное требование можно выполнить только путём проливания материала внутри формы для литья. Существует три метода формования литьём:

- ручное заполнение;
- формование под давлением;
- формование под вакуумом.

Исследовав данные методы, выяснены следующие нюансы. Самый мало затратный способ — это ручная формовка. Но при этом добиться направленного течения смеси, практически, невозможно. В двух оставшихся случаях добиться направления течения смеси не трудно. Но, в отличии от формования под давлением, при вакуум формовке из смолы (одна составляющих смеси) выкачиваются газы, которые при затвердевании образуют пузырьки внутри изделия. Поэтому третий метод рассмотрен как наиболее эффективный. Наполнитель заранее смешивается со смолой до заливки в форму. Смесь втекает снизу формы для литья, затем подымается вверх, заполняя всё пространство.

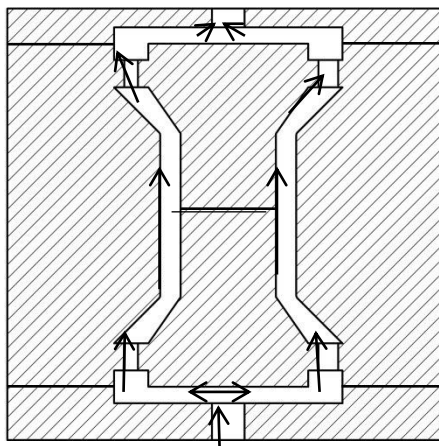


Рисунок 29 – Схема заполнения полуформ.

Во время течения смеси вдоль формы литья частицы наполнителя из-за своих геометрических форм становятся вдоль потока и, притираясь друг к другу, выдавливают излишки смолы. После заполнения формы смесью, частицы уже

не могут изменить своё направление, так как они очень плотно заполнили пространство и между ними мало свободного места.

Таким образом, из смолы удаляются лишние выделяемые газы, которые могут привести к пузырькам внутри детали, и объём смолы внутри детали минимален. За счёт плотного расположения частиц друг-другу достигается высокая магнитопроводимость. Что уменьшает, нагрев детали под воздействием переменного электромагнитного поля. Время затвердевания детали составляет 17 минут. Но полная усадка достигается через сутки после извлечения. Так как объём используемой смолы минимален, усадка изделия менее 1,2%.

4.3. Конструирование дисков ротора.

Диск ротора – это основной элемент вращения, который испытывает осевые и продольные нагрузки.

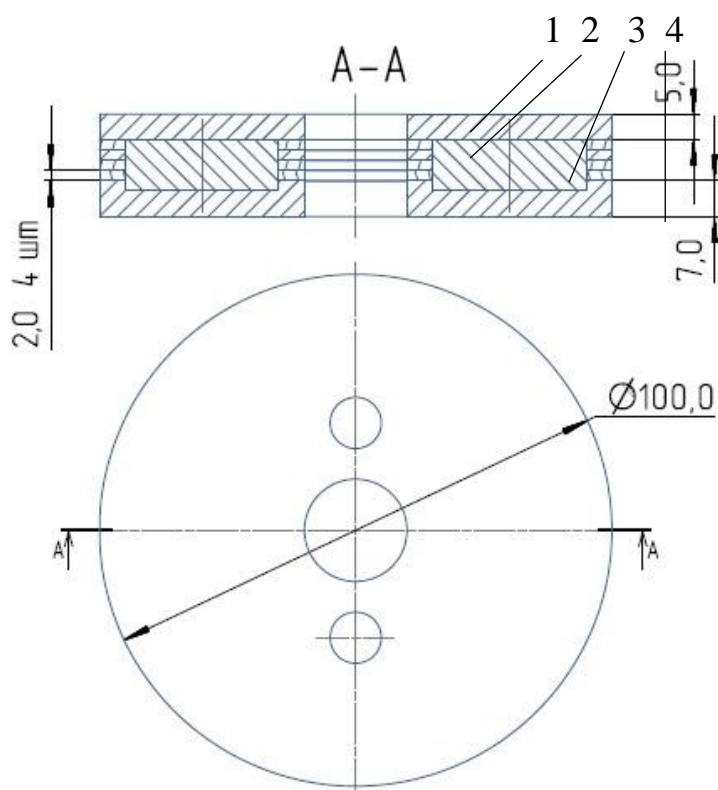


Рисунок 30–Эскиз диска ротора.

1-диск из сталь 40, 2 – диски медные, марки «мЗр» толщиной 2 мм, 3 – постоянный неодимовый магнит, 4 – медный диск толщиной 7мм.

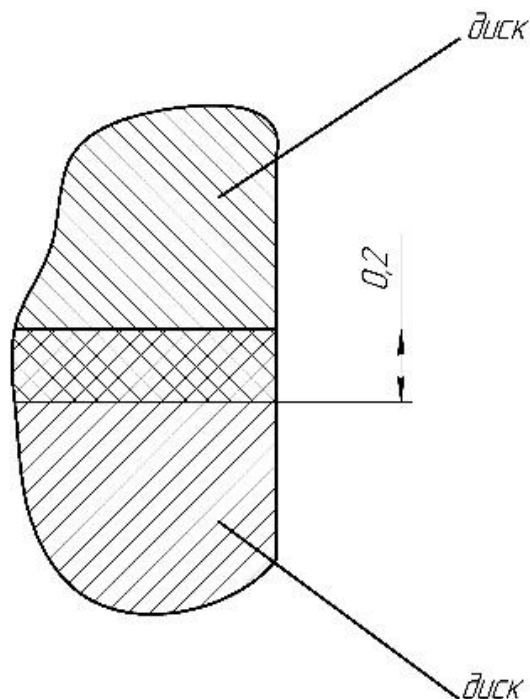


Рисунок 31 клеевой слой

Ротор гибридного электродвигателя — это сборная конструкция. Ротор состоит из вала и двух дисков ротора. Каждый диск также является сборной конструкцией, состоящий из других дисков. Каждый диск прикрепляется друг к другу с помощью клея(рис.31).

Постоянные магниты ротор тянут к обмоткам. При этом пластины «1» и «4» работают на трёхточечный изгиб. А все пластины «2» на сжатие и растяжение. При этом клеевой слой испытывает сдвиговые нагрузки. Во время работы двигателя от индуцирования электромагнитных полей на дисках выделяется тепло до 60°C [16]. Для лучшего отведения тепла разработаны диски из медных пластин. Так как чем ниже температура внутри диска, тем больше срок службы неодимовых магнитов.

Также при выборе клеевого слоя необходимо учитывать повышенный температурный режим и высокие нагрузки на отрыв. Также клеевой слой должен обеспечивать герметичность каждого диска от других дисков. После выхода двигателя в рабочие обороты диски начинают работать на растяжение, направленное от центра к краю диска, и нагрузки от удержания постоянных

магнитов на своём месте. При работе двигателя каждый магнит стремится повернуться по направлению электромагнитного поля, который достигают постоянные магниты под углом 60°С относительно лицевой поверхности магнита.

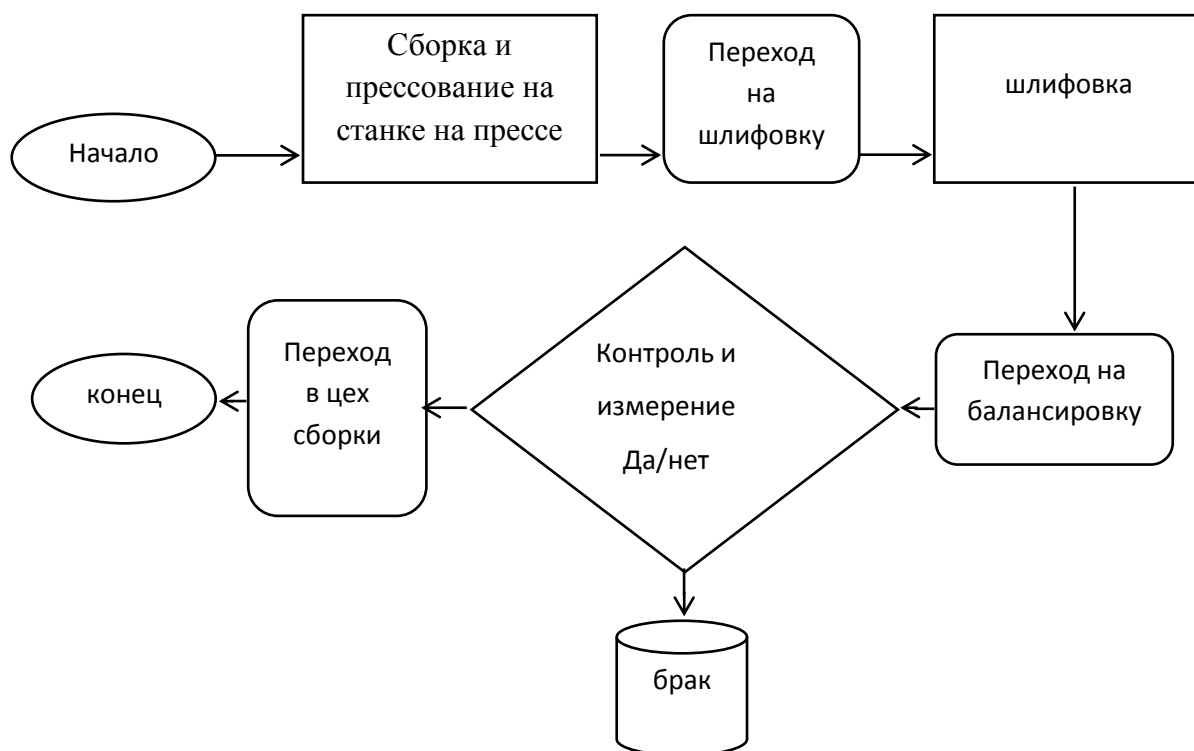
Для склеивания дисков выбран эпоксидный клей «Permatex 4 minMulti-MetalEpoxy». Данная марка сырья меньше всех выделяет газы при отверждении, что обеспечивает хорошее качество. Также для отверждения данного клея нет необходимости обеспечения высоких температур, вакуума и давления.

Составлены тех процесс и схема переходов сборки диска ротора.

Таблица 4.1 – Тех процесс сборки диска ротора

№ операции	Станок и инструмент	Тип обработки и режимы
005	Тех плита	Установка диска «4» на тех плиту
010	Кисть	Нанесение клеевого слоя
015	Тех плита, кисть	Установка дисков «2» с клеевым слоем
020	Тех плита	Установка магнитов
025	Тех плита	Установка диска «1»
030	Пресс 54MP150D	Запрессовать. Усилие 500 кг.
035	Шлифовальная машина, Тех плита	Шлифовать вытекший наружу клеевой слой.
040	Шлифовальная машина	Шлифовать диск до нулевого размера со стороны диск «1»
045	Балансировочный станок ВС-311В	Сбалансировать диск ротора.
050	Мультиметр	Контроль

Схема переходов при изготовлении диска ротора.



В начале сборки все детали диска ротора склеиваются между собой с помощью эпоксидного клея и прессуются. Чтоб выдержать соосность деталей используется тех плита с направляющими, которая обработана силиконовой смазкой. Смазка служит антиадгезионным слоем. Для выдержания зазора между пластинами вставляются специальные элементы, которые после процесса прессования тзылекаются. Далее изделие отверждается при температуре 20-22 °С . Очень важно соблюсти диапазон температуры, так как при превышении температуры приводит к появлению воздушных пузырей, а при низком температуры увеличивается время отверждения и велика вероятность неполного отверждения.

Следующем этапом в производственном цикле является шлифовка облоев. После шлифовки деталь балансируется и направляется на участок контрольного измерения. Важным параметром является высота диска ротора, так как конструкция двигателя требует точного выдерживания зазора между статором и ротором. Высота диска измеряется на установке с лазерным

измерением. Диск детали вставится на стол станка и прижимается к нему с помощью электромагнитного поля. Измеряется с помощью лазера.

После всех процедур изделие уходит либо на дальнейшую сборку двигателя, либо в брак.

4.4. Разработка промежуточной втулки.

Промежуточная втулка, которая удерживает два диска на расстоянии 16 мм друг от друга, работает только на сжатие. Два диска ротора притягиваются друг другу с силой четырёх магнитов. Сила сжатия равняется силе притяжения двух пар магнитов друг другу. Сила притяжения двух магнитов измеряется с помощью пружины с известным коэффициентом жёсткости. Один магнит закрепляется неподвижно, а второй магнит закрепляется на конец пружины. Между магнитами ставится материал диамагнетик с высотой 16 мм. Два магнита при поднесении друг другу захлопываются. На другой конец пружины создаётся сила обратно направленное к силе второго магнита. Сила постепенно увеличивается до тех пор, пока не разорвёт связь между двумя магнитами. При этом измеряется максимальное удлинение пружины. Исходя из полученных данных, вычисляется сила притяжения магнитов на расстоянии 16 мм. Таким образом, два магнита на расстоянии притягиваются друг другу силой равной 392 Н. Так как в двигателе имеются два пара магнитов, 392Н умножаем на два и получаем общее давление на промежуточную втулку 784 Н. Значит, сила сжатия на промежуточную втулку равна 784 Мпа/мм². Рассчитывается минимальная толщина стенок втулки. Для определения толщины стенок используется формула:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (4.1)$$

Где N -Нормальные напряжения, А – площадь поперечного сечения[16].

Из расчётов получается, что требуемая минимальная площадь поперечного сечения $A = 26,08 \text{ мм}^2$. Подставляется значение A в формулу 4.2 и вычисляется ΔR , то есть минимальная толщина стенки втулки.

$$A = \pi(R_2 - R_1)^2 \quad (4.2)$$

Значения поставлены в формулу и вычислено $\Delta R = 2,88 \text{ мм}$. Запас прочности для стеклопластиковых материалов должно составить $2/3$. Вычислены размеры с запасом прочности:

$$b = 2.28 + 2.88 * 2/3 = 4.4 \text{ мм}$$

Все размеры промежуточной втулки вычислены и показаны на рисунке 32.

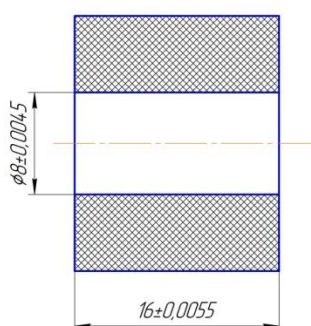


Рисунок 32 – эскиз промежуточной втулки

Втулка изготавливается методом намотки. Для этого изготавливается отдельная форма. Форма состоит из: двух крайних дисков и одного цилиндра – будущего вала. Габариты цилиндра диаметр 8 мм и 106 мм в высоту. Сборка формы: Два крайних диска закрепляются на цилиндре так, чтобы один конец втулки начинался на расстоянии 35 мм от начала вала, а другой – через 16 мм после первого. После диски покрываются антиадгезионным средством. Приготавливается смесь полиэфирной смолы с отвердителем. Для

намотки используем ровинговое стекловолокно толщиной в диаметре 3 мм. Процесс наматывания. Форма покрывается тонким слоем полиэфирной смолы. После наматывается первый слой стекловолокна. Эти процессы повторяются до тех пор, пока внешний диаметр втулки не достигает 16,8 мм. После намотки изделия сушиться до полного отверждения. После отверждения у форм извлекаются две крайние диски. Удаляются облои с

изделия. А вал остаётся приклеенным к промежуточной втулке. Проходит контроль размеров штангенциркулем, максимальная допустимая погрешность $\pm 0,1$ мм в высоту и диаметре $\pm 0,2$ мм. При соответствии всех размеров требованиям, изделия идёт на сборку двигателя.

Характеристика промежуточной втулки. Формовка изделия методом намотки даёт большие прочностные характеристики при сжатии. Изделие хорошо противостоит к образованию бочкообразных форм, так как все волокна работают на растяжение, при котором используется их максимальная прочность. Также изделия хорошо работает на сжатие, так как смола имеет большой запас прочности на сжатие, а волокна уменьшают хрупкость всего материала, удерживают от растрескивания. Таким образом изделия получают очень прочным и меньше веса по сравнению с металлическими втулками.

4.5. Разработка крайней втулки.

Крайняя втулка работают только на сжатие по центральной оси. Главная задача этих элементов удерживать диски ротора при их отталкивании от статора во время попадания одинаковых полюсов магнитов и статора. Сила сжатия в этот момент достигает $2 \cdot (+F^a)$. Максимальная сила сжатия втулок:

$$F = 2 \cdot 294 \text{ Н} = 588 \text{ Н}.$$

Рассчитывается минимальная толщина стенки для крайней втулки аналогично расчётам промежуточной втулки.

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (4.1)$$

Где N-Нормальные напряжения, A – площадь поперечного сечения.

Из расчётов получается, что требуемая минимальная площадь поперечного сечения $A = 61.8 \text{ мм}^2$. Подставляется значение A в формулу 4.4 и вычисляется ΔR , то есть минимальная толщина стенки втулки.

$$A = \pi (R_2 - R_1)^2 \quad (4.2)$$

Значения поставлены в формулу и вычислено $\Delta R = 2,88$ мм. Запас прочности для стеклопластиковых материалов должно составить $2/3$. Вычислены размеры с запасом прочности:

$$b = 2.28 + 2.88 * 2/3 = 4.4 \text{ мм}$$

Эта втулка изготовлена также как и «средняя втулка» методом намотки. Изготовлена форма для намотки: два диска и один цилиндр. Требуемые минимальные размеры крайних втулок определены экспериментальным путём. Втулка в двигателе работают на сжатие вдоль оси. Требуемая каналами вентиляции высота щели 5 мм, то есть длина по оси втулки составит 5мм. Внутренний диаметр втулки равен диаметру вала: $\varnothing 8$ мм. Толщина стенки втулки рассчитывается аналогично расчётам промежуточной втулки. Толщина стенки втулки с запасом прочности равна 3мм. Все размеры указаны на чертеже втулки.

Габариты дисков: диаметр 12 мм, толщина 2 мм, цилиндра: длина 5мм, диаметр 8 мм. Собрана форма и аналогично разработке средней втулки, разрабатываются крайняя втулка. Отличие в процессе разработки в том, что после отверждения цилиндр от формовки извлекается прессовочной машине. С помощью шлифовальной машины удаляются облои.

4.6. Разработка передних и задних крышек.

Диаметр крышек исходит из расчётов вентиляционных каналов. Требуемый диаметр задней крышки равен 94 мм. Диаметр передней крышки будет на 2 мм больше чем у задней крышки. Потому что диаметр корпуса в одном торце будет на 2 мм больше, для обеспечения снятия с формы (раздел «разработка корпуса электродвигателя»). Для определения толщины проведены расчёты величин действующих сил на крышки. Основная сила – это сила действующая перпендикулярно крышке. Крышке по центру крайняя втулка давит с силой равной:

$$2 * F^a. + F^a = [0 \text{ Н}; 294 \text{ Н}].$$

Получается максимальная сила $F^a = 294 \text{ Н}$. Следовательно, максимальная сила действующая на крышку равен $2 \cdot 294 \text{ Н} = 588 \text{ Н}$. При этом крышки работают на сложный изгиб, для наглядности показано в 3d рисунок 33.

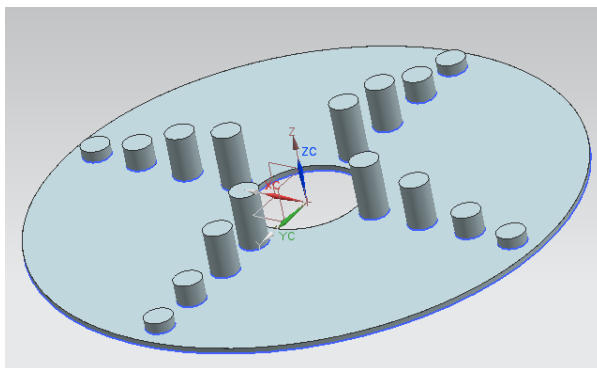


Рисунок 33– эпюра крышки на изгиб в 3d.

По центру диска давит сила сжатия. А края диска закреплены по четырём точкам. Можно упростить задачу, если эти силы разобьём на две группы. Каждые точки стоящие в противоположном направлении группируются в одну группу. А центральная точка относится к обеим группам. Так как сила давит по центру, там находится самый большой уровень напряжений. А при движении от центра к краю, до середины этого пути, напряжения рассеивается по всей площади круга, но ближе к точкам, прикрепленным по краям, напряжения опять начинает собираться в точки. Только вся сила делиться на четыре равных между собой меньшие силы. Таким образом, максимальная прочность требуется по центру диска и при соблюдении условия по прочности в центре диска, оно будет соблюдаться и по всему оставшемуся периметру крышки. Так же крышка работает на сжатие краем подшипника вдоль плоскости XOY из рисунка 4.13, то есть параллельно стенкам крышек. Таким образом, во время работы двигателя крышки испытывают сложные напряжённые состояния, которые не даются ручному подсчёту. Поэтому требуемая минимальная толщина крышек будет определяться

экспериментальным путём. Для снижения объёма поиска делаются расчёты известных сил и напряжений, находятся для них прочностные характеристики.

1 этап. Решение задачи на трёхточечный изгиб. Для вычисления минимальной толщины крышки при работе на изгиб, взята формула предела прочности при изгибе из раздела трёхточечного изгиба.

$$\sigma = \frac{1,5F_{max}l}{bh^2} \quad (4.5)$$

Где h – толщина стенок изделия. Для нахождения размеров, используются данные полученные в ходе исследования материала на изгиб. Некоторые значения подставляются из таблицы 3.2. Ширины полоски нет, так изделие представляет собой форму диска. Ширина взята мысленным разрезом диска на две одинаковые бруска, соединённые между собой в центре, рисунок 33.

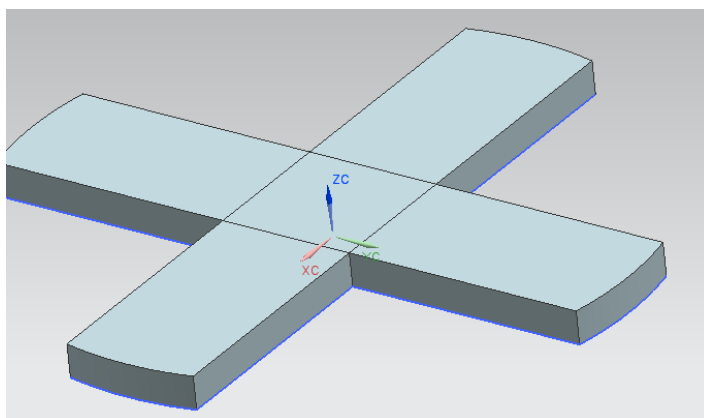


Рисунок 34 – представление крышки в виде двух брусков.

Так как оба образца одинаковые проводится вычисления для одного. За ширину образца взято диаметр подшипника, так как все усилия идут от подшипника. Вместо F_{max} ставится величина силы изгиба, действующая по центру крышки. Длина образца заменяется диаметром крышки. Все размеры подставляются и вычисляются.

$$286 = \frac{1,5 * 588 * 94}{30 * h^2}$$

$$h^2 = \left(\frac{1,5 * 588 * 94}{286} \right) / 30 \text{ мм}^2$$

$$h^2 = 9,66 \text{ мм}^2$$

$$h=3.1 \text{ мм}$$

По расчётам изгиба толщина крышки должна быть не менее 3,1 мм.

Определение минимальной толщины дисков экспериментальным путём. Минимальная толщина Готовый образец закрепляется в четырёх точках на испытательный стол и по центру диска давится с нарастающей силой от 0 до 588 Н. Толщина увеличивается до тех пор, пока изделие не выдержит приложенную нагрузку. Результаты испытаний внесены в таблицу 4.1. Исходя из полученных результатов, минимальная толщина диска в пределах от 5мм до 6 мм. С целью исключения возможности разрушения изделия принимается минимальной толщиной 6 мм.

2 этап. Проводятся расчёты на сжатие вдоль стенки крышек. Для расчёта берётся мысленный разрез крышки на брусок, рисунок 4.14. В крышки по центру будут спрессованы подшипники.

Таблица 4.1 – Результаты эксперимента по подбору толщины крышек.

h, мм	Примечание.
3 мм	Разрушается, по центру
4 мм	Разрушается, по центру и в трещины в местах крепления по краям.
5 мм	Разрушаются по местам крепления
6 мм	Не разрушается

Наружный диаметр подшипника 20 мм. Определяется высота бруска:

$$h = R_{\text{крышки}} - r_{\text{подшипника}} = 47 - 10 = 37 \text{ мм.}$$

Ширина бруска принимается равной 20 мм, так как диаметр подшипника равен 20 мм и одна половина подшипника вдоль оси давит на брусок. Из формулы 4.6 необходимо вычислить значение « h » - толщину стенки крышки.

$$\sigma_B^C = \frac{F_{max}^C}{b \cdot h}, \quad (4.6)$$

$$h = \frac{\left(\frac{F_{max}^C}{\sigma_B^C}\right)}{b} = \frac{\left(\frac{9430}{2860}\right)}{20} = 1,65 \text{ (мм)}$$

Минимальная требуемая толщина стенок из расчётов на сжатие 1,65 мм. Так как испытания на изгиб показали, что стенки должны быть изготовлены с более толстого слоя материала – от 6 мм, крышка силы, действующие на сжатие, выдержит.

Полученные данные соответствуют минимальным значениям, рассчитываем значения с запасом прочности. Для стеклопластиков запас прочности получается 2/3 прочности. Для придания запаса прочности изменяем толщину стенки:

$$h_3 = h + h \cdot 2/3 = 6 + 6 \cdot 2/3 = 10 \text{ мм}$$

Все требуемые размеры рассчитаны и проверены натурными испытаниями. Окончательный вид крышек представлен на рисунке 4.15.

Для изготовления дисков сделаны формы. Плоская, ровная поверхность, две трубы под диаметры дисков и высотой 12 мм, верхние плоскости под диаметры дисков для прессования. Погрешность данных изделий не должно превышать ± 0.1 мм. Увеличение погрешности данных изделий приведёт к не параллельности дисков ротора и статора. При нарушении параллельности начнётся биение ротора из-за разности сил, действующие на разные стороны дисков ротора.

Процесс изготовления крышек. Вырезается формы из стеклоткани. Заранее приготавливается по тридцать три слоя стеклоткани, по 0.3 мм толщиной каждый. Все полости формы заливки обрабатываются антиадгезионным средством, для избежания прилипания изделия к формам. Приготавливается

смесь полиэфирной смолы и отвердителя. Трубы закрепляются к нижней поверхности формы. Каждый слой накладывается в форму и пропитывается. После завершения наложения слоёв, сверху ставится верхняя часть формы для прессования. Верхняя часть выдавливает излишки смолы, что придаст больше прочности и меньше веса изделию. Изделие в таком состоянии сушится до полного отверждения. После сушки извлекается из формы, проходит мех обработку по удалению облоев. По краям высверливаются четыре отверстия диаметром 5,5 мм. Вырезается резьба М6 с шагом резьбы 1,25. В центральное отверстие на каждом диске впрессовывается подшипник качения. При прессовании подшипника в отверстие важно соблюдать перпендикулярность угла захода подшипника. Отличие между передним и задним крышками только в размере диаметра и наличие вентиляционных отверстий. На рисунке 35 показаны обе крышки, слева А-А – разрез задней крышки, справа Б-Б – передняя.

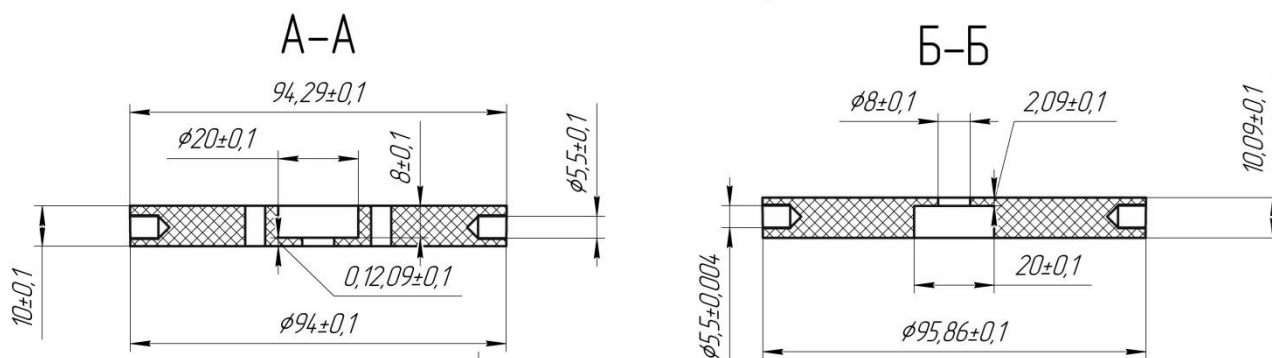


Рисунок 35 – Разрез торцевых крышек.

4.7. Разработка корпуса

Корпус электродвигателя – это деталь, на котором прикрепляются все не вращающиеся детали. По форме корпус электродвигателя это полый цилиндр. Высота цилиндра определена исходя из размеров каналов охлаждения и толщин торцевых крышек. Таким образом, высота цилиндра составляет 70 мм. Внутренний диаметр должен быть 94 мм и больше. Корпус изготавливается методом намотки. Для намотки приготовлена форма цилиндрической формы.

Точнее форма сделано в форме усечённого конуса с углом наклона $89^{\circ}11'$. Для облегчения извлечение изделия из формы один торец формы в диаметре увеличено на 2 мм и составляет 96 мм. Толщина стенок должна обеспечивать прочность на растяжение и против ударов. Величина силы, действующая на растяжение корпуса, равна силе отталкивания постоянных магнитов от статора. Из расчётов главы «Разработка передних и задних крышек» ясно, что сила сжатие действующая на изгиб диска равна 588 Н.. От этого следует что сила растяжения стенок корпуса вдоль оси равна силе изгиба крышек 588 Н.. Стенки корпуса должны выдерживать силу растяжения равную 588 Н распределённую по всему диаметру. Эффективная толщина стенки корпуса определяется формуле 4.5.

$$\sigma = \frac{N}{A}, \quad (4.7)$$

Где N -Нормальные напряжения, A – площадь поперечного сечения находится из формулы 4.6.

$$A = S_R - S_r \quad (4.8)$$

Где S_R – Площадь поперечного сечения цилиндра, включающая в себя толщину стенки корпуса, S_r – площадь поперечного сечения внутренней полости корпуса.

$$r = 47 \text{ мм}, R - ?$$

$$A = \pi R^2 - \pi r^2 = \pi(R^2 - 47^2) = 3,14R^2 - 6936.26 \text{ мм}^2$$

$$290 = \frac{13920}{3,14R^2 - 6936.26}$$

$$R = 47.16 \text{ мм}$$

Толщина стенки корпуса это разница двух радиусов: $47,16 - 47,0 = 0,16 \text{ мм}$.

Из расчётов на растяжение получается, что минимальная требуемая толщина стенки корпуса составляет 0.16 мм.

Так же корпус двигателя испытывает различные сложные моменты и силы, которые можно определить только в ходе натурных испытаний после запуска двигателя. Главным моментом является момент на кручение. Двигатель передней частью закрепляется на оборудование. А статор стоит по середине и получается, возникает момент на кручение корпуса от середины до передней части, рисунке36.

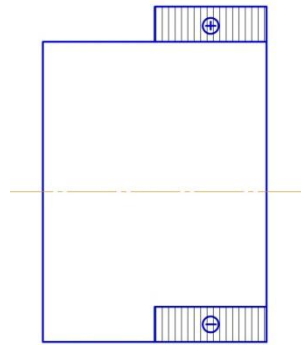


Рисунок 36 – эпюра силы кручения корпуса.

Для определения максимального касательного напряжения используется формула 4.7 и 4.8. С помощью этих формул определяем минимальную толщину стенки выдерживающий момент вращения.

$$\tau_{max} = \frac{M_k}{J_\rho} \rho_{max} \quad (4.9)$$

Прогнозируемый крутящий момент M_k электродвигателя должна быть около 15 Н·м. Для точных данных требуется запуск двигателя и его испытание в разных режимах.

$$J_\rho = \frac{\pi D^4}{32} - \frac{\pi d^4}{32} \quad (4.10)$$

$$J_\rho = \frac{\pi D^4}{32} - \frac{\pi(94)^4}{32}$$

$$30 = \frac{15}{\frac{\pi D^4}{32} - \frac{\pi(94)^4}{32}} \quad 35; \quad 30 = \frac{525}{\frac{\pi D^4}{32} - \frac{\pi(94)^4}{32}} ;$$

$$17,5 = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - 94^4)$$

$$D = 96,7 \text{ мм}$$

$$b = \frac{D-d}{2} = 1,35 \text{ мм}$$

На кручение требуемая минимальная толщина стенки получается больше, поэтому взято значение толщины стенки из расчётов на кручение.

Добавляется запас прочности. $b_3 = b + b \cdot 2/3 = 1,35 + 1,35 \cdot 2/3 = 2,25 \text{ мм}$.

Таким образом, рассчитаны все размеры стенки корпуса электродвигателя. Для проверки результатов расчёта проведены экспериментальные испытания образцов.

Изготовлено три образца с толщиной стенок 2 мм, 2,5 мм и 3 мм. Результаты испытаний занесены в таблице 4.2.

Таким образом, минимальная толщина стенок корпуса лежит в интервале от 1,5 мм до 2 мм. С учётом присутствия других моментов, сил растяжения, сжатия и изгиба, на толщину корпуса добавлено 50% запаса прочности.

$$b_3 = 2 + 2 \cdot 0,5 = 3 \text{ мм}$$

Таблица 4.2 – результаты экспериментов на кручение и растяжение.

№	а, мм	Примечание	
		Кручение	Растяжение
1	1,3 мм	Разрушился	Не разрушился
2	1,5 мм	Разрушился	Не разрушился
3	2 мм	Не разрушился	Не разрушился

Следующим шагом проведены испытания удара прочности по методу копра. Испытание удара прочности проводится с помощью падающего груза на изделие. Изделие должно выдерживать минимум 40 Н.. Взято стальной груз весом 500 г сферической формы. Груз поднимается на высоту 1м над грузом и

опускается на изделие свободным падением. При этом сила действующая при ударе на корпус определяется формулой:

$$F=mgh.$$

где, m - масса падающего груза в кг, g – константа свободного падения, h – высота поднятия груза над изделием.

$$F=0.5*9.8*1=4.9\text{кг}.$$

То есть сила действия на материал около 48 Н. 8 Н взят для получения предела прочности с запасом. Корпуса электродвигателя с толщинами с толщинами 2,5 мм и 3 мм прошли испытания удара прочности. При падении груза на корпус с толщиной стенки 2 мм, образец не выдержал. На нём появились трещины. Длина трещин составляло от 2мм до 23 мм, что не соответствовало требованиям. Корпус двигателя с толщиной стенки 3 мм выдержал испытания на ударопрочность.

Таким образом, определены окончательные размеры корпуса электродвигателя, рисунок 37.

Процесс конструирования корпуса. По торцам формы ставятся диски ограничители. Все полости обрабатываются антиадгезионным средством – полиролью. После обработки форма сушится в сушильном шкафу.

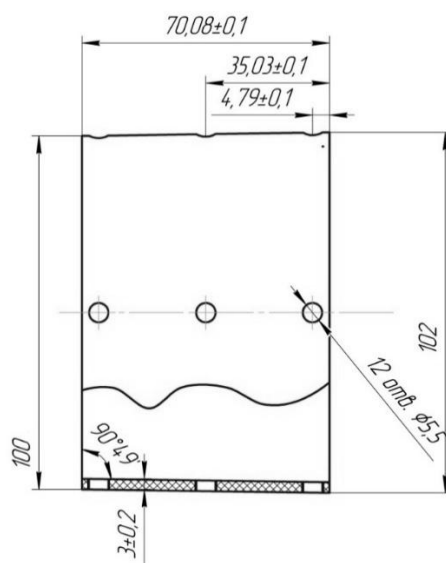


Рисунок 37 – разрез корпуса двигателя.

Вывод по главе 4.

Разработанные элементы гибридного электродвигателя соответствуют техническим требованиям: прочность, на сжатие, на изгиб, теплопроводность. Для достижения технических задач применен стеклопластик: на основе полиэфирной смолы и стеклоткани, Разработаны композитные материалы на основе полиэфирной смолы, наполненный с алюминиевым порошком и стружкой из электротехнической стали. Новые материалы обеспечивают надёжность конструкции и дают возможность уменьшить габариты и вес, также увеличить КПД двигателя и ремонтпригодность. Разработанный материал, состоящий из эпоксидной смолы и стружки электротехнической стали, может быть применён и в других электротехнических изделиях. Использование стеклопластиковых деталей улучшило электромагнитные показатели двигателя на 22-23% по сравнению с существующими.

Заключение

Изучено конструкции двигателей, применяемых в промышленности. В основном это асинхронные и шаговые двигатели. Первый заслуживает внимание по своей простоте и надёжности, а второй по своим высоким показателям. Типы применяемых материалов в обоих двигателях схожи. В основном это электротехнический сталь, сталь 40Х и Ст3. Рассмотрев их особенности строения и применяемые материалы, разработан конструкция гибридного электродвигателя с применением композитных материалов, состоящих из полиэфирной смолы, стекловолокна, железной и алюминиевой порошков.

Детали двигателя, которые испытывают разнонаправленные нагрузки, рассчитаны на программных обеспечениях САЕ систем.

Разработанные элементы гибридного электродвигателя соответствуют техническим требованиям. Для достижения технических задач применен ранее известный стеклопластик и разработаны новые композитные материалы: полиэфирная смола, наполненная с алюминиевым порошком и полиэфирная смола, наполненная стружкой из электротехнической, стали. Новые материалы обеспечивают надёжность конструкции и дают возможность уменьшить габариты и вес, также увеличить КПД двигателя и ремонтпригодность. Разработанный материал, состоящий из эпоксидный смолы и стружки электротехнической стали, может быть применён и в других электротехнических изделиях. Например, в трансформаторах.

Использование стеклопластиковых деталей улучшило электромагнитные показатели двигателя на 22-23%.

Предполагается дальнейшее изучение возможность замены материалов корпусных элементов двигателя на более дешёвые и технологичные, чем реактопласты.

Список литературы

1. Интернет ресурс: «Свободная энциклопедия википедия», статья «Шаговый электродвигатель»
https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D0%B0%D0%B3%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B%D1%8C (Дата обращения 09.05.18)
2. Интернет ресурс: «Свободная энциклопедия википедия», статья «Асинхронная машина».
https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%81%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%D0%B0 (Дата обращения 09.05.18)
3. Статья «Технологический процесс изготовления крышки электродвигателя» Сабитов Р.И.
4. Интернет ресурс: «Центральный металлический портал РФ»
http://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/alu/AL4 (Дата обращения 10.05.18)
5. Интернет ресурс «Центральный металлический портал РФ»
http://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/chu/SCH25 (Дата обращения 10.05.18)
6. Интернет ресурс: «Центральный металлический портал РФ»
http://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/search/ (Дата обращения 10.05.18)
7. Интернет ресурс: «ЭИ Ресурс» <http://www.polyefirmsmola.ru/pn-609.htm>
(Дата обращения 11.05.18)
8. Интернет ресурс: «Клеи, смолы, компаунды и герметики» [электронный ресурс] URL: <http://alfa-sintez.com/smola-ed-20.html> (Дата обращения 11.05.18)
9. Интернет ресурс: «Sammas сам мастер» <http://sammas.ru/tekhnologii-i-terminologiya/tipy-steklyannykh-volokon.html> (Дата обращения 11.05.18)
10. Интернет ресурс: «Центральный металлический портал РФ»
http://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/35 (Дата обращения 11.05.18)

11. Интернет ресурс: <http://files.stroyinf.ru/Data1/17/17811/> (Дата обращения 12.05.18)
12. Интернет ресурс: «Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации» <http://docs.cntd.ru/document/gost-25-604-82> (Дата обращения 12.05.18)
13. Интернет ресурс http://www.infomine.ru/files/catalog/159/file_159.pdf (Дата обращения 12.05.18)
14. Интернет ресурс: «Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации» <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-50583-93> (Дата обращения 12.05.18)
15. Интернет ресурс: «StandartGOST.ru» http://standartgost.ru/g/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_4651-2014 (Дата обращения 12.05.18)
16. Интернет ресурс: «Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации» <http://docs.cntd.ru/document/9054217> (Дата обращения 12.05.18)
17. Интернет ресурс: http://edu.dvgups.ru/METDOC/ITS/STRMEH/COPROMAT/METOD/UP_TEST/frame/2.htm (Дата обращения 13.05.18)
18. Патент №2394334 - Способ изготовления электрической машины
19. Патент РФ № 2466204 - Характеризуемые материалом матрицы
20. Патента № 387949 – Электротехнический материал
21. Патент № 2012125231
22. Патент № 2566247 - Электротехническое изделие, изготовленное из токопроводящего композиционного материала, и способ его изготовления
23. Статья «Технологический процесс изготовления крышки электродвигателя» Сабитов Р.И.
24. В.Н. Сафин Композиционные материалы [Текст лекций] - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010.

25. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. - М.: Техносфера, 2004.
26. Ставров, В. П. Формообразование изделий из композиционных материалов: учеб. пособие / В. П. Ставров. - Минск: БГТУ, 2006.
27. Справочник по композиционным материалам. В 2-х т./ Под ред. Дж.Любина. - М.: Машиностроение, 1988.
28. Композиционные материалы: Справочник /В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др. - М.: Машиностроение, 1990.
29. Интернет ресурс: Смолы полиэфирные
http://www.composite.ru/materialy1/smoly_poliefirnye/
30. Интернет ресурс: Стеклоткань конструкционная <http://www.igc-siberia.ru>
31. Интернет ресурс: Global composite solutions
<http://composites.owenscorning.com>
32. Батаев, А. А. Композиционные материалы / А.А. Батаев, В.А. Батаев. - М.: Университетская книга, Логос, 2006. - 252 с.
33. Виноградов, Б. А. Действие лазерного излучения на полимерные материалы. Научные основы и прикладные задачи. В 2 книгах. Книга 1. Полимерные материалы. Научные основы лазерного воздействия на полимерные диэлектрики / Б.А. Виноградов, К.Е. Перепелкин, Г.П. Мещерякова. - М.: Наука. Ленинградское Отделение, 2006. - 122 с.
34. Виноградов, Б. А. Действие лазерного излучения на полимерные материалы. Научные основы и прикладные задачи. В 2 книгах. Книга 2. Полимерные материалы. Практическое применение лазерных методов в изучении и обработке / Б.А. Виноградов, К.Е. Перепелкин, Г.П. Мещерякова. - М.: Наука. Ленинградское Отделение, 2007. - 279 с.
35. Затуловский, С.С. Литые композиционные материалы / С.С. Затуловский, В.Я. Кезик, Р.К. Иванова. - М.: Техника, 2009. - 237 с.

36. Кутепов, А. М. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов / А.М. Кутепов, А.Г. Захаров, А.И. Максимов. - М.: Наука, 2004. - 282 с.
37. Машиностроение. Энциклопедия. Том 3-6. Технология производства изделий из композиционных материалов, пластмасс, стекла и керамики. - Москва: ИЛ, 2006. - 288 с.
38. Мюллер, А. Окрашивание полимерных материалов / А. Мюллер. - М.: Профессия, 2006. - 280 с.
39. Поповский, В.Г. Применение полимерных материалов в консервной промышленности / В.Г. Поповский, Я.Г. Муравин, Т.Б. Дюльгер. - М.: Пищевая промышленность, 2009. - 232 с.
40. Тимофеева, Марина Юрьевна; Долوماتов Михаил Юрьевич Композиционные Материалы И Их Применение В Промышленности / Юрьевич Тимофеева Марина Юрьевна; Долوماتов Михаил. - Москва: Высшая школа, 2007. - 117 с.
41. Ханин, М. В. Изнашивание и разрушение полимерных композиционных материалов / М.В. Ханин, Г.П. Зайцев. - М.: Химия, 2009. - 256 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ