

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОРДОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н. П. ОГАРЁВА»

Институт механики и энергетики

Кафедра механизации переработки сельскохозяйственной продукции

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой МПСХП

д.т.н., профессор

А.В. Котин

« 06 » 2018г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

РАЗРАБОТКА СОСТАВА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АНТИФРИКЦИОННОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ СВЕРХМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Автор магистерской диссертации



К.А. Куликовская

Обозначение магистерской диссертации

МД-02069964-35.04.06-60-18

Направление 35.04.06 «Агроинженерия»

Руководитель работы

д.т.н., профессор



В.Н. Водяков

Нормоконтролер

д.т.н., профессор

В.Н. Водяков

Рецензент

к.т.н., профессор

А.Н. Седашкин

Саранск
2018

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.П.ОГАРЕВА»
Институт механики и энергетики
Кафедра механизации переработки сельскохозяйственной продукции

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой МПСХП
д-р тех. наук, проф.
Котин А.В.
« / / 2018 г.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
(в форме магистерской диссертации)

Студент: Куликовская Ксения Анатольевна

1 Тема: Разработка состава и исследование свойств антифрикционного композита на основе сверхмолекулярного полиэтилена утверждена по МордГУ № 8158-с от 06.10.2016 г.

2 Срок представления проекта к защите: 10.06.2018 г.

3 Исходные данные для проектирования: результаты научно-исследовательской практики, патентная и техническая литература.

4 Содержание пояснительной записки:

4.1 Состояние проблемы и основные задачи исследования

4.2 Программа и методика экспериментальных исследований

4.3 Результаты экспериментальных исследований и расчет теплообменного аппарата

4.4 Техничко-экономическая эффективность внедрения результатов исследования

Руководитель работы:

Задание принял: « 1 » февраля 2017 г.

д.т.н., профессор В.Н. Водяков

 К.А. Куликовская

Реферат

Магистерская диссертация содержит 111 листов, 47 рисунков, 10 таблиц, 24 формул, 71 источников использованной литературы.

АНАЛИЗ, СИЛОВЫЕ ГИДРОЦИЛИНДРЫ, СВЕРХМОЛЕКУЛЯРНЫЙ ПОЛИЭТИЛЕН, АНТИФРИКЦИОННЫЕ КОМПОЗИТЫ, САМОАРМИРОВАНИЕ, РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ, ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ.

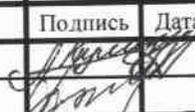
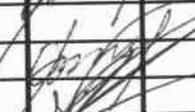
Объект исследования – антифрикционный композиционный материала основе СВМПЭ для направляющих элементов силовых гидроцилиндров и других антифрикционных деталей сельскохозяйственной техники.

Цель проекта – разработка составов, технологических процессов производства и переработки и исследование свойств антифрикционного композита на основе СВМПЭ для изготовления направляющих элементов силовых гидроцилиндров сельскохозяйственной техники.

Методы исследования - Экспериментальные исследования выполнены по оригинальным и известным методикам с использованием современного научно-исследовательского оборудования и средств измерений лаборатории «Энергоэффективные технологии переработки сырья и материалов» Института механики и энергетики.

Исследование физико-механических характеристик образцов композитов производилось по ГОСТ 11262-80, ГОСТ 12423-66, ГОСТ 4648-71, ГОСТ 4650-80. При исследовании процессов механохимической активации композиций и реологических испытаниях использованы компьютерные программы и оригинальные методики фирм – поставщиков оборудования.

Обработка результатов исследований проведена с использованием методов теории вероятности и математической статистики с помощью современных вычислительных средств и программы «Excel 2010».

МД-02069964-35.04.06-60-18				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Куликовская		
Провер.		Водяков		
И. контр.		Водяков		
И. т.		Котин		
Разработка состава и исследование свойств антифрикционного композита на основе сверхмолекулярного полиэтилена			Лит.	Лист
Пояснительная записка			3	111
ИМЭ, Агроинженерия				

Полученные результаты – 1. Получены уравнения и проведен теоретический анализ сил, действующих в трибосопряжениях «поршень – гильза цилиндра» и «передняя крышка – шток» силового гидроцилиндра С100/40×200-344 трактора МТЗ 80.

Установлено, что значения сил реакций R и трения $F_{тр}$ деталей штокового и поршневого уплотнительных узлов изменяются в процессе всего рабочего цикла гидроцилиндра, что является причиной неравномерного износа рабочих поверхностей трибосопряжений.

Максимальные значения реакций достигаются в переднем положении поршня и составляют 3850 Н. Контактные напряжения возрастают с ростом износа рабочих поверхностей от 4,35 МПа (при начальной величине зазора 0,091 мм) до 13,7 МПа (зазор 0,4 мм). Отсюда следует, что по мере увеличения зазора между сопряженными деталями скорость изнашивания должна быстро нарастать.

2. Разработана конструкция и изготовлена приставка к лабораторному смесителю периодического действия *PolyLabRheomix 600 OS* для изучения трибологических характеристик антифрикционных композитов на основе СВМПЭ. С использованием данной приставки были получены сравнительные значения коэффициентов трения антифрикционных композитов на основе ПА 6 и СВМПЭ в условиях сухого трения и трения со смазкой при температуре 20 °С, контактном давлении 0,1 МПа и диапазоне скоростей скольжения 0,1 – 0,5 м/с.

Установлено, что в условиях трения со смазкой значения коэффициента трения композитов СВМПЭ более чем в 1,3 раза ниже коэффициентов трения полиамидных композитов.

3. Разработан техпроцесс механохимической активации сухосмешанных композиций СВМПЭ и наноразмерных модификаторов на планетарно-шаровой мельнице «Пульверизетте-7», обуславливающий повышение

упругопрочностных характеристик СВМПЭ и однородное распределение				МД-02069964-35.04.06-60-18			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лит.	Лист	Листов
Разраб.	Куликовская					4	111
Провер.	Водяков				ИМЭ, Агроинженерия		
Н. контр.	Водяков				Пояснительная записка		
Утв.	Котин						

в последнем.

Установлено, что оптимальная длительность обработки сухосмешанных композиций СВМПЭ и наноразмерных модификаторов составляет 67...75 минут.

4. Разработан оригинальный состав композиции на основе СВМПЭ и углеродных нанотрубок (УНТ) фирмы «Tuballmatrixbeta».

Установлено, что ввод 0,1 % УНТ обеспечивает (по отношению к чистому СВМПЭ) повышение предела текучести на 35 %, прочности на 28 %, начального и конечного модулей упругости на 23 % и 29 %, соответственно.

5. В результате триботехнических испытаний в условиях трения со смазкой (при температуре 25 °С, скорости скольжения 0,15 м/с и контактном давлении 2,5 МПа) установлено, что ввод 0,1 % УНТ обеспечивает снижение интенсивности износа СВМПЭ от $2,46 \cdot 10^{-8}$ до $1,85 \cdot 10^{-8}$ отн.ед. При этом интенсивность износа коммерческого полиамидного композита УПА6-15А составила $2,73 \cdot 10^{-8}$ отн. ед.

6. Исследована возможность реализации эффекта самоармирования при изготовлении модели опорно-направляющего кольца гидроцилиндра из разработанного композита методом двухстадийного прессования композиции СВМПЭ с вытяжкой расплава вдоль оси кольцевой полости пресс-формы.

Установлено, что вытяжка расплава в пределах 15...20 % обеспечивает прирост модуля упругости для образцов из СВМПЭ (без м/а) – 9 %; для образцов из СВМПЭ (м/а) – 8 %; для образцов СВМПЭ + 0,1% УНТ (м/а) – 12 %.

7. Разработаны рекомендации по применению разработанного антифрикционного материала в объектах сельскохозяйственной техники.

Область применения - магистерская диссертация может быть рекомендована к внедрению на предприятиях перерабатывающей промышленности.

					МД-02069964-35.04.06-60-18		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Куликовская			Лит.	Лист	Листов
Провер.		Водяков				5	111
Н. контр.		Водяков			ИМЭ, Агроинженерия		
Утв.		Котин					

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	8
1	СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	13
1.1	Устройство силовых гидроцилиндров сельскохозяйственной техники	13
1.1.1	Конструкция основных узлов традиционных гидроцилиндров	13
1.1.2	Материалы основных деталей современных гидроцилиндров	17
1.2	Полимерные материалы для производства антифрикционных деталей узлов трения силовых гидроцилиндров	18
1.2.1	Трение и изнашивание полимерных материалов	19
1.2.2	Основные типы полимерных материалов, применяемых для производства антифрикционных деталей и требования к ним	19
1.2.3	Достоинства и недостатки полиамида и композиций на его основе в качестве антифрикционных материалов	22
1.2.4	Эксплуатационные и технологические характеристики коммерческих композиционных материалов антифрикционного назначения	22
1.2.5	Технологические процессы и оборудование для производства и переработки полимерных композиций	23
1.3	Композиционные материалы триботехнического назначения на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ)	26
1.3.1	Физико-механические и реологические характеристики СВМПЭ	27
1.3.2	Наноразмерные и тонкодисперсные модификаторы, улучшающие упруго-прочностные и трибологические характеристики СВМПЭ	28
1.3.3	Методы совмещения углеродных нанотрубок с полимерной матрицей	29
1.4	Методы переработки СВМПЭ и композиций на его основе	32
1.5	Методы получения самоармированных композиций СВМПЭ	35
1.5.1	Горячее компактирование	35
1.5.2	Горячее прессование чередующихся слоев	36
1.5.3	Совместная экструзия	37

1.6	Методы изучения эксплуатационных и технологических характеристик полимерных композиций	39
1.6.1	Приборы и методы изучения физико-механических свойств полимерных композиций	39
1.6.2	Приборы и методы изучения трибологических свойств полимерных композиций	41
1.6.3	Приборы и методы изучения реологических свойств полимерных композиций	42
1.7	Цели и задачи исследования	44
2	МЕТОДИКИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	46
2.1	Анализ контактных нагрузок в трибосопряжениях силового гидроцилиндра С100/40×200-344 трактора МТЗ 80	46
2.2	Разработка конструкции трибометрической приставки к лабораторному смесителю периодического действия <i>PolyLabRheomix 600 OS</i>	52
2.3	Теоретический анализ сил, действующих на образец при его эксцентричном расположении относительно ротора трибометрической приставки	55
2.4	Методика триботехнических испытаний композитов на трибометрической приставке к смесителю <i>НААКЕ PolyLabRheomix 600 OS</i>	58
2.5	Методика механохимической активации композиций СВМПЭ с наноразмерными модификаторами на планетарно-шаровой мельнице «Пульверизетте-7»	59
2.6	Методика компрессионного формования пластин для физико-механических и реологических испытаний на лабораторном прессе <i>GT-7014-H50C</i>	61
2.7	Методики исследования технологических и эксплуатационных характеристик композитов СВМПЭ	62
2.7.1	Методика исследования упруго-прочностных характеристик композитов на испытательной машине UAI-7000	62
2.7.2	Методика исследования реологических характеристик расплавов композитов в динамическом режиме вынужденных колебаний на реометре НААКЕ MARS III	65
2.7.3	Методика триботехнических испытаний композитов на реометре НААКЕ MARS III, снабженном трибометрической приставкой	67

2.7.4	Методика получения самоармированных композиций СВМПЭ	70
3	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	72
3.1	Определение оптимального времени механохимической активации смеси СВМПЭ с наноразмерными модификаторами на планетарно-шаровой мельнице «Пульверизетте-7»	72
3.2	Исследование физико-механических характеристик композитов «СВМПЭ +SiO ₂ » и «СВМПЭ +Al ₂ O ₃ »	77
3.3	Исследование упругопрочностных характеристик самоармированных композитов СВМПЭ	80
3.4	Исследование реологических характеристик композитов «СВМПЭ» и «СВМПЭ + УНТ»	84
3.5	Исследование трибологических характеристик композитов «СВМПЭ + УНТ»	87
4	РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РАЗРАБОТАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА И ТЕХНОЛОГИЙ ЕГО ПРОИЗВОДСТВА	91
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	101
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	103

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Анализ материально-технического оснащения предприятий АПК свидетельствует о том, что уровень его развития продолжает снижаться. По данным ГОСНИТИ количество тракторов до трех лет службы по всем сельскохозяйственным предприятиям АПК РФ составляет 5,5 %, четыре–восемь лет – 11,3 %, девять лет и более – 83,2 %, доля зерноуборочных комбайнов со сроком службы до трех лет составляет 9 %, четыре–восемь лет – 13,7 %, девять лет и более – 77,3 %. Около 75 % машинно-тракторного парка в аграрном секторе российской экономики выработало свой срок службы и требует повышенных затрат на поддержание его в работоспособном состоянии, которые в настоящее время составляют более 65 млрд. руб.

Сложившаяся ситуация представляет серьезную угрозу для обеспечения необходимых объемов производства, насыщения рынка отечественной сельскохозяйственной продукцией, сырьем и продовольствием.

В условиях ограниченных финансовых и материальных ресурсов проблема технического перевооружения сельскохозяйственного производства не может быть решена только за счет увеличения поступления новой техники. Значительная роль в этом процессе отводится разумному использованию имеющегося парка машин, поддержание его технического уровня за счет квалифицированного технического обслуживания и ремонта.

Ремонт агрегатов с восстановлением и упрочнением деталей – технически обоснованное и экономически оправданное мероприятие. Оно позволяет ремонтно-обслуживающим предприятиям и мастерским хозяйств сокращать время простоя неисправных машин, оборудования, улучшать показатели надежности и использования машин.

Известно, что надежность современных тракторов и других сельскохозяйственных машин определяется надежностью агрегатов гидросистемы. Особое место здесь занимает силовой гидроцилиндр. Опыт

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

эксплуатации гидрофицированных машин показал, что на долю гидроцилиндров приходится 17...30 % отказов всей гидросистемы.

По данным ГОСНИТИ, областных, краевых и республиканских структур АПК ежегодно списывается более 340 тыс. силовых гидроцилиндров отечественной и зарубежной сельскохозяйственной техники. Некоторые сельскохозяйственные предприятия вынуждены проводить ремонт собственными силами. При этом из-за отсутствия опыта, технологий и оборудования ресурс отремонтированных агрегатов зачастую не превышает 30–60 % от ресурса новых.

В связи с вышеизложенным, разработка и внедрение новой технологии ремонта, основанной на использовании в трибосопряжениях силовых гидроцилиндров полимерных деталей из антифрикционных композитов на основе сверхмолекулярного (сверхвысокомолекулярного) полиэтилена, сокращенно СВМПЭ, позволит снизить себестоимость и сроки ремонта, что имеет существенное значение для развития АПК.

Степень разработанности темы. Систематизация и критический анализ материалов по тематике исследования проведены на основании работ известных ученых: П.В.Сенина, С.А.Величко, В.Н.Водякова, П.А.Ионова, В.В. Кузнецова, В.И. Борисова, Н.В. Ракова, П.В. Чумакова, Н.И. Шубина, И.В. Воскобойникова, В.А. Ушкова, В.К. Астанина, В.В. Глухих, В.В. Богданова и других.

Однако, несмотря на большое количество исследований в области ремонта и восстановления силовых гидроцилиндров, в том числе с использованием антифрикционных композитов, возможности совершенствования состава композитов и технологий ремонта трибосопряжений силовых гидроцилиндров с использованием полимерных деталей, далеко не исчерпаны. В частности, недостаточно изученными остаются: проблемы разработки состава антифрикционных композитов на основе СВМПЭ), содержащих такие тонкодисперсные и наноразмерные модификаторы как шунгит, диоксид кремния, углеродные нанотрубки и

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

другие; технология их производства; эксплуатационные и технологические характеристики данных композитов.

Работа выполнена в рамках приоритетного направления работ университета (ПНР 1 № 28/2010 «Энергосбережение и новые материалы»).

Цель исследований – разработка составов, технологических процессов производства и переработки и исследование свойств антифрикционных композитов на основе СВМПЭ для изготовления антифрикционных деталей силовых гидроцилиндров сельскохозяйственной техники.

Объект исследования – антифрикционные композиционные материалы на основе СВМПЭ для изготовления антифрикционных деталей силовых гидроцилиндров сельскохозяйственной техники.

Предмет исследования – процессы производства и переработки, технологические и эксплуатационные свойства композиционных материалов антифрикционного назначения на основе СВМПЭ.

Научную новизну работы составляют:

– составы антифрикционных композиционных материалов на основе СВМПЭ, модифицированного углеродными нанотрубками (УНТ) и нанокристаллическим диоксидом кремния (SiO_2);

– техпроцесс механохимической активации сухосмешанного состава «СВМПЭ + 0,1% УНТ» на планетарно-шаровой мельнице «Пульверизетте-7»;

– результаты изучения эксплуатационных и технологических характеристик антифрикционных композиционных материалов на основе СВМПЭ, модифицированного углеродными нанотрубками и нанокристаллическим диоксидом кремния (SiO_2).

Практическую значимость представляют:

– теоретическое обоснование и конструкция трибометрической приставки к лабораторному смесителю *Rheomix 600 OS*;

– технологический процесс упрочнения изделий из композита «СВМПЭ + 0,1 % УНТ» методом самоармирования;

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

– рекомендации по применению в АПК полученных антифрикционных композитов и технологий их производства.

Методы исследования. Экспериментальные исследования выполнены по оригинальным и известным методикам с использованием современного научно-исследовательского оборудования и средств измерений лаборатории «Энергоэффективные технологии переработки сырья и материалов» Института механики и энергетики.

Исследование физико-механических характеристик образцов композитов производилось по ГОСТ 11262-80, ГОСТ 12423-66, ГОСТ 4648-71, ГОСТ 4650-80. При исследовании процессов механохимической активации композиций и реологических испытаниях использованы компьютерные программы и оригинальные методики фирм – поставщиков оборудования.

Обработка результатов исследований проведена с использованием методов теории вероятности и математической статистики с помощью современных вычислительных средств и программы «*Excel 2010*».

На защиту выносятся:

– состав антифрикционного композиционного материала на основе СВМПЭ, модифицированного углеродными нанотрубками и нанокристаллическим диоксидом кремния (SiO_2);

– техпроцесс механохимической активации сухосмешанного состава «СВМПЭ + 0,1% УНТ» на планетарно-шаровой мельнице «Пульверизетте-7»;

– результаты изучения эксплуатационных и технологических характеристик антифрикционных композиционных материалов, модифицированных углеродными нанотрубками и нанокристаллическим диоксидом кремния (SiO_2);

— технологический процесс упрочнения изделий из композита «СВМПЭ + 0,1 % УНТ» методом самоармирования.

Апробация. Основные положения и результаты исследований докладывались на расширенном заседании кафедры механизации переработки

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

сельскохозяйственной продукции ГОУВПО «МГУ им. Н. П. Огарева» (2018 г.).
По результатам исследований опубликовано в 2016-2018 г. четыре работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы. Работа изложена на 111 страницах машинописного текста, включает 47 рисунка и 10 таблиц, список литературы содержит 71 наименований. Работа оформлена в соответствии с требованиями и правилами, предусмотренными стандартом СТП 006-2014 ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарева».

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Устройство и принципы работы силовых гидроцилиндров сельскохозяйственной техники

1.1.1 Конструкция основных узлов гидроцилиндров

Гидроцилиндр это объемный гидродвигатель, в котором ведомое звено (шток, плунжер) совершает прямолинейное возвратно-поступательное движение относительно корпуса гидроцилиндра. Гидроцилиндры делятся на силовые и моментные [1]. Более широкое применение в сельскохозяйственной технике получили силовые гидроцилиндры.

Силовые гидроцилиндры делятся на гидроцилиндры двухстороннего действия и одностороннего действия [2].

Гидроцилиндр одностороннего действия совершает усилие на подвижном звене, которое направлено только в одну сторону (рабочий ход цилиндра). В противоположном направлении подвижное звено просто перемещается обратно под действием силы тяжести или возвратного механизма, например, пружины. У этих цилиндров есть лишь одна рабочая плоскость. У гидроцилиндров двустороннего действия возможностей несколько больше. У них две рабочих плоскости, то есть рабочие усилия на выходном звене они могут создавать в двух направлениях. Чтобы обеспечить возвратно-поступательное движение жидкость поочередно поступает под давлением в полости цилиндра. Когда одна из полостей наполняется жидкостью, другая соединяется со сливом. У гидроцилиндра имеется две полости: штоковая полость, в которой располагается шток, и поршневая [3].

Силовой гидроцилиндр (рис. 1.1) состоит из следующих основных конструктивных элементов [4]:

- 1) соединение головок цилиндров;

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

- 2) поршня со штоком;
- 3) направляющей штока;
- 4) демпферного устройства;
- 5) грязесъемника;
- 6) устройства для удаления воздуха;
- 7) устройства для подвода рабочей жидкости;
- 8) устройства для крепления гидроцилиндра к машине.

Соединение головок с гильзой в значительной степени определяет технологию обработки гильзы, а также технологию сборки всего гидроцилиндра.

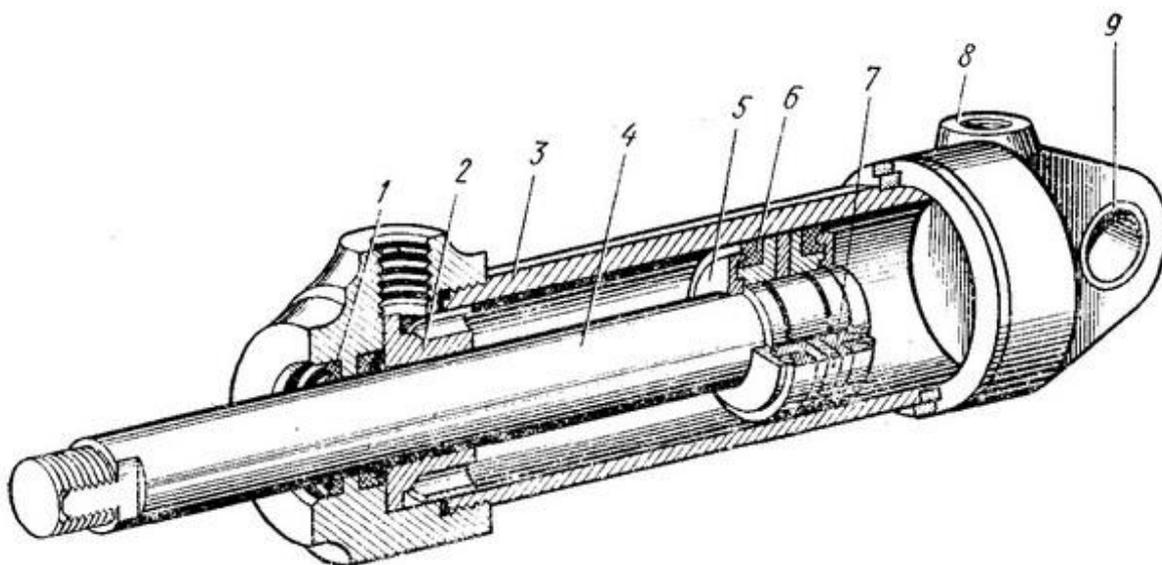


Рисунок 1.1 – Общая схема гидроцилиндра [5]: 1-грязесъемник; 2- грундбукса; 3-гильза, 4-шток; 5-поршень; 6- уплотнение поршня; 7 – уплотнительные кольца поршня; 8-отверстие для подвода жидкости; 9-проушина.

На рис. 1.2 представлена конструкция современного силового гидроцилиндра [5], в состав которого входят свыше 20 наименований антифрикционных полимерных деталей, эксплуатируемых в масляной среде при истирающих воздействиях в условиях достаточно высоких температур, в числе которых специальные износостойкие опорные кольца 3, комбинированные уплотнения 2, грязесъемники и др.

При разработке конструктивного решения узла поршня со штоком основными факторами, определяющими выбор той или иной конструкции,

										Лист
										15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	МД-02069964-35.04.06-60-18					

являются: тип уплотнения поршня с гильзой, конструкция поршня и способ крепления поршня к штоку (рис. 1.3).

ОПОРНО-УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОЦИЛИНДРОВ Рном ≤ 16 МПа (160 кг/см²)

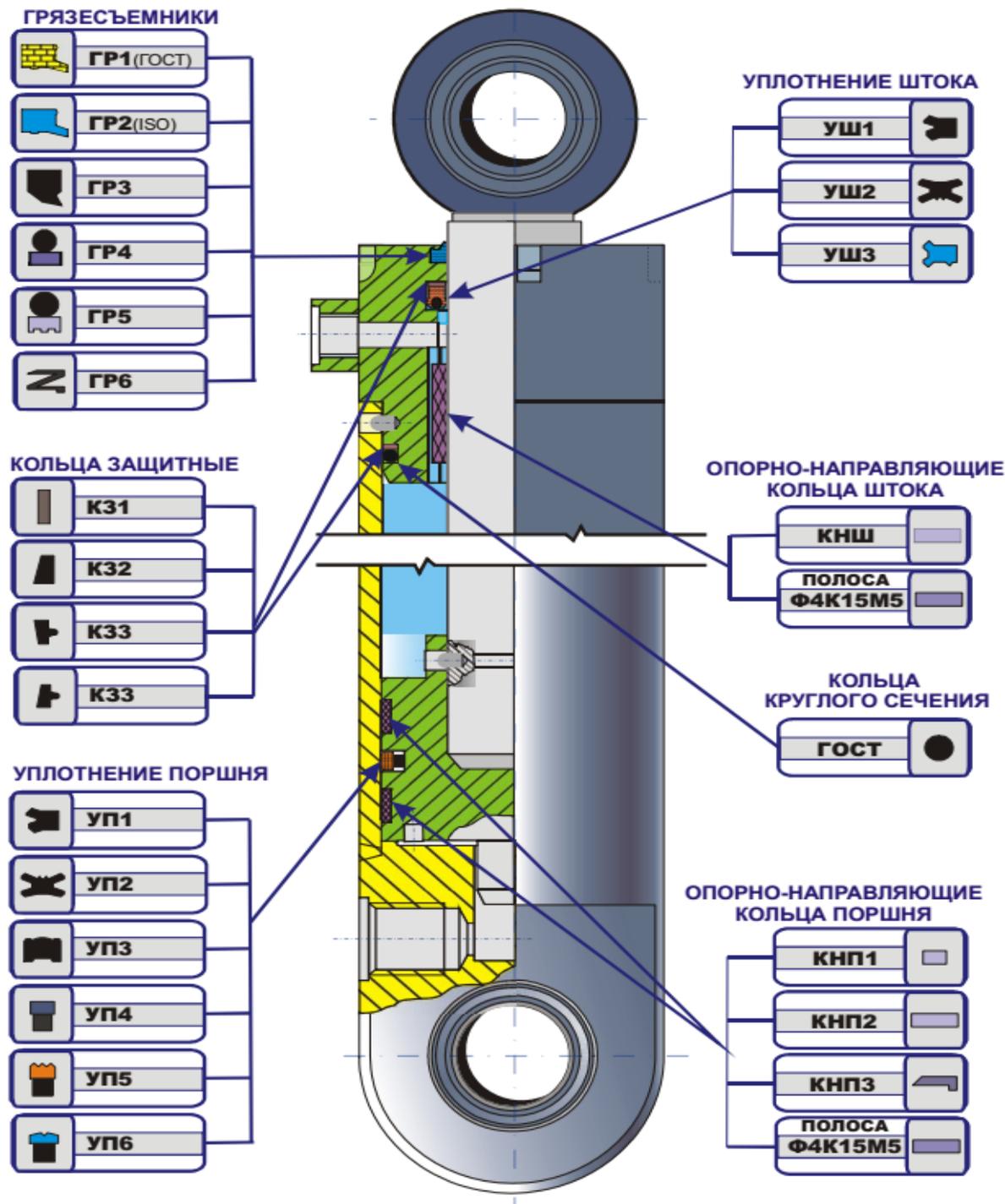


Рисунок 1.2 – Типичная конструкция современного силового гидроцилиндра

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

МД-02069964-35.04.06-60-18

Лист

16

По своей конструкции поршни делятся на цельные и составные. На практике встречаются два основных способа крепления поршня к штоку: соединение при помощи резьбы; соединение безрезьбовое.

Шток представляет собой стержень круглого сечения, на один из концов которого крепится поршень, а на другой – элемент, соединяющий гидроцилиндр с исполнительными механизмами машины. Для защиты штоков от попадания стружки, летящих камней, а также от пыли и грязи применяются защитные кожухи. Защитные кожухи бывают составные и цельные. Эти кожухи обычно изготовлены из

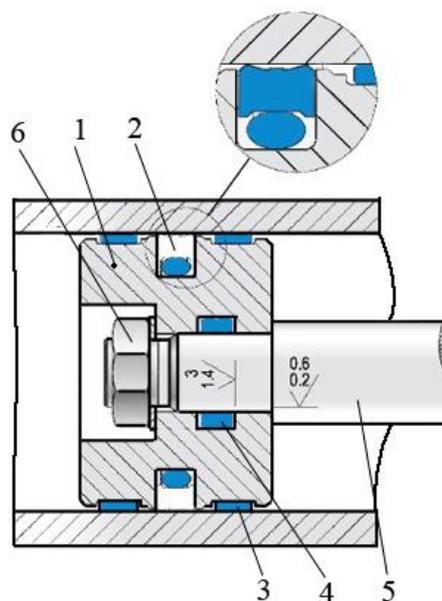


Рисунок 1.3 – Поршневой узел современного гидроцилиндра с опорными кольцами из полиамидного композита [6]: 1- поршень; 2- уплотнение поршня; 3- опорные кольца; 4- кольца резиновые; 5-шток; 6-гайка

ткани с металлическими кольцами. Цельные кожухи изготавливаются из маслостойкой резины в пресс-формах. Кожухи одним своим концом крепятся на штоке, а других на головке гидроцилиндра [6].

Типы установки и крепления гидроцилиндров к машине можно разделить на два типа [2]:

- 1) гидроцилиндры жестко закрепленные;
- 2) гидроцилиндры шарнирные.

1.1.2 Материалы основных деталей современных гидроцилиндров

Гильзы. Гильзы силовых гидроцилиндров в основном изготавливаются из стальных труб, а также могут изготавливаться из стальных поковок, чугуна и стального литья.

Штоки. Штоки могут быть сплошные и полые. Сплошные штоки изготавливаются из углеродистых сталей марок 35, 45 а также из хромистой стали марки 40Х. Полые штоки изготавливаются сварными из труб по ГОСТам 8734-58 и 8752-58. Материал труб - сталь 35[3,7].

Поршень. Изготавливается из антифрикционного чугуна, серого чугуна, а также из сталей с покрытием бронзой, латунью, капроном [8].

Головки гидроцилиндров. Головки изготавливаются из стальных поковок, стали марок 35 и 45, отливок из сталей 35ЛП и 45ЛП, а также чугуна марок СЧ 21-40 и СЧ 32-52.

Направляющей штока может быть сама головка гидроцилиндра. В этом случае она должна быть изготовлена из чугуна и иметь на рабочей поверхности наплавку из бронзы, латуни, капрона. Направляющей штока также может служить втулка, запрессованная или вставленная по посадке в головку [3,8].

Манжеты резиновые уплотнительные. Для изготовления резиновых манжет применяют резины марок В-14; В-14-1; 3825; 3826; 4004; 4327; УА-1 и ИРП 1290.

Кольца резиновые круглого сечения. Кольца по ГОСТ 9833-61 изготавливаются из резины групп 1, 2, 3, 4. Практически для изготовления круглых колец применяются те же марки резины, что и для изготовления манжет [10].

Уплотнения резино – тканевые шевронные. Шевронные уплотнения по ГОСТ 9041-59 изготавливаются из хлопчатобумажной ткани «доместик» (ГОСТ 1104-41), прорезиненной с двух сторон графитной резиновой смесью. Нажимные и опорные кольца могут изготавливаться из других материалов [15,17].

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

1.2 Полимерные материалы для производства антифрикционных деталей узлов трения силовых гидроцилиндров

Гидроцилиндры и другие образцы современной сельхозтехники не могут обойтись без узлов трения, в которых необходимы низкая сила трения и высокая устойчивость к истиранию. Кроме уплотнений и направляющих элементов гидроцилиндров к таким узлам относятся всевозможные подшипники скольжения и качения, вкладыши, втулки, шарнирные соединения, шестеренчатые передачи, направляющие механизмов и многие другие. Для изготовления таких узлов ранее использовали антифрикционные сплавы на основе свинца или олова, такие как бронза, баббит и др. Но эти материалы дороги и не всегда отвечают всем необходимым эксплуатационным и технологическим требованиям. Поэтому имеется необходимость в более широком выборе антифрикционных материалов [12].

Для этих целей полимеры привлекательны по нескольким причинам:

- легкость (технологичность) переработки,
- низкий удельный вес,
- высокая коррозионная стойкость [13].

Полимерные антифрикционные материалы в настоящее время изготавливаются в основном на основе полиамидов и карбоцепных полимеров, фторопластов. Полиамиды являются термопластичными полимерами, обладают довольно высокими механическими свойствами, технологичны и применяются в качестве втулок, направляющих, уплотняющих колец. Недостатком данного полимера является его гидрофильность, обуславливающая с течением времени снижение упруго-прочностных характеристик.

Большой интерес для создания антифрикционных деталей представляет фторопласт. Он химически инертен, не способен собирать влагу, обладает высокой пластичностью, низким модулем упругости, и очень низким коэффициентом трения, также теплостоек и термопластичен [14].

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
						19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1.2.1 Трение и изнашивание полимерных материалов

Трение внешнее, механическое сопротивление, возникающее в плоскости касания двух соприкасающихся тел при их относительном перемещении. Сила сопротивления, направленная противоположно относительно перемещению данного тела, называется силой трения, действующей на это тело. Трение внешнее – диссипативный процесс, сопровождающийся выделением тепла.

Трение скольжения – сила, возникающая при поступательном перемещении одного из контактирующих тел относительно другого и действующая на это тело в направлении, противоположном направлению скольжения.

Характеристика трения скольжения – коэффициент трения скольжения f_c – безразмерная величина, равная отношению силы трения к нормальной нагрузке; Внешние условия (нагрузка, скорость, шероховатость, температура, смазка) влияют на величину трения внешнего не меньше, чем природа трущихся тел, меняя его в несколько раз. Относительные перемещения контактирующих поверхностей и их механические взаимодействия приводят не только к изменениям состояния и свойств материалов поверхностных слоев, но и к их разрушению. Обычно разрушение происходит в форме отделения от поверхностей трения мелких частиц материала, что приводит с течением времени к изменению размеров и формы контактирующих деталей. Это явление и называют изнашиванием [16]. Изнашивание является сложным многоуровневым процессом. Основным инициатором изнашивания является деформация материала контактирующих поверхностей под действием контактных напряжений и температур.

1.2.2 Основные типы полимерных материалов, применяемых для производства антифрикционных деталей и требования к ним

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

Для производства антифрикционных деталей применяются материалы на основе как термопластичных, так и термореактивных полимеров. Термопласты (полиамиды, полиолефины, фторопласты, полиацетали, полиимиды, полифенилсульфиды, полисульфоны, полиэфиркетоны) используются ненаполненные и в виде матрицы антифрикционных композиционных материалов. Термореактивные полимеры (эпоксидные и фенолформальдегидные) применяются исключительно в виде матрицы композиционных материалов. Наиболее благоприятное сочетание антифрикционных, прочностных и технологических свойств имеют композиционные материалы[17].

Основным критерием при выборе материала для узлов трения гидроцилиндров являются затраты энергии (Вт) на трение:

$$A = \mu P v, \quad (1.1)$$

где P – нормально приложенное к трущейся поверхности напряжение [Па], v – относительная скорость движения поверхностей [м/с], μ – коэффициент трения.

Поэтому одним из наиболее важных требований к материалам узлов трения является **низкий коэффициент трения**. Для материалов уплотнительных колец, грязесъемников и направляющих элементов гидроцилиндров коэффициент трения не должен превышать 0,2 [18].

Не менее важной характеристикой материала узла трения является высокая стойкость к абразивному износу – износостойкость.

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания. В настоящее время износостойкость чаще всего измеряется в мм износа на 1 мм пути трения. Основной характеристикой, определяющей износостойкость материала, является предел текучести материала при сдвиге σ_t . Установлено, что сдвиговое напряжение $\tau = P\mu$ в зоне контакта не должно превышать предела текучести материала при сдвиге[19].

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

Как уже отмечалось, при работе узла трения в нем выделяется энергия в виде тепла, и узел может существенно разогреваться. Поэтому при работе узла трения требуется отвод тепла от зоны контакта. Для этого материал должен обладать высокой теплопроводностью и высокой температурой размягчения. Материалы с низкой температурой размягчения работают в узлах трения очень неустойчиво.

Таким образом, основными требованиями к материалу узлов трения силовых гидроцилиндров являются:

- низкий коэффициент трения скольжения ($\mu < 0,2$);
- высокая износостойкость, характеризуемая параметром интенсивности износа I (мм износа/мм пути);
- высокий предел текучести при сдвиге σ_T (Па)
- высокая твердость [модуль упругости E (МПа)];
- высокий коэффициент теплопроводности λ (Вт/(мК));
- высокая температура размягчения T_p [20].

В настоящее время общепризнано, что данный комплекс требований наилучшим образом удовлетворяется антифрикционными полимерными материалами, приведенными в (табл. 1.1) [21].

Как видно из таблицы, удовлетворительным коэффициентом трения обладает только полиамид 6 (ПА 6).

Таблица 1.1 - Коэффициент трения и износостойкость полимеров (трение о низкоуглеродистую сталь при нагрузке 12 Н/см²)

Полимер	Износостойкость, г	Коэффициент трения, μ
Полиэфир	17	0,5
Поликарбонат	41	0,6
Поливинилхлорид	50	0,45
Полиамид 66	10	0,15-0,4
Полиамид 6	8	0,1 – 0,2
Полиэтиленвысокой плотности	4,2	0,2 – 0,6
Полипропилен	22	0,4-0,6
Полиимид	2,1	0,68

Полиметилметакрилат	18	0,6
---------------------	----	-----

Однако по износостойкости полиамид 6 (капролон) заметно уступает более дорогому полимеру – полиимиду. Кроме того, все полимеры обладают очень низкой теплопроводностью. Поэтому очевидна необходимость в улучшении указанных свойств полимеров вводом различных модифицирующих добавок для возможности их использования в высоконагруженных узлах [22].

1.2.3 Достоинства и недостатки полиамида и композиций на его основе в качестве антифрикционных материалов гидроцилиндров

К достоинствам полиамидов в качестве антифрикционных материалов можно отнести следующие:

- 1) минимально возможный коэффициент трения, обуславливающий снижения потерь усилия на трение;
- 2) достаточную износостойкость, обеспечивающая приемлемый ресурс эксплуатации;
- 3) способность быстро прирабатываться к твердым поверхностям и легко приспособливаться к новым условиям работы узла;
- 4) повышенное сопротивление заеданию и задирам;
- 5) достаточную прочность;
- 6) достаточное сопротивление усталости, коррозии, эрозии и абразивному изнашиванию;
- 7) совместимость с различными видами модифицирующих добавок [23].

Существенными недостатками полиамидов являются: невысокая теплопроводность; низкая несущую способность; высокое водопоглощение [24].

1.2.4 Эксплуатационные и технологические характеристики коммерческих композиционных материалов антифрикционного назначения

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

Как уже отмечалось, наиболее важными характеристиками узлов трения являются предельные контактные нагрузки P .

Наиболее широкое применение нашли композиты на основе полиамида, наполненного дисульфидом молибдена. Они устойчиво работают до значений Pv порядка $0,1 \div 0,15$ МПа·м/с. Их главным достоинством является легкость переработки и низкий удельный вес. Применяют также композиции изполиимида, наполненного графитом. Эти материалы устойчиво работают при температурах до 150 °С[25]. Использование реактопластов в качестве связующего для антифрикционных композиций позволяет существенно повысить предельные нагрузки и температуру эксплуатации узлов трения. Наиболее известной является композиция на основе фенолформальдегидного связующего, наполненного асбестом и графитом.

1.2.5 Технологические процессы и оборудование для производства и переработки полимерных композиций

Экструзионное оборудование. В отечественной литературе экструдеры часто именуются червячными прессами. Вращающийся шнек (червяк) захватывает из приемного отверстия материал, уплотняет его в рабочем цилиндре и под давлением выталкивает в фильеру. Кроме того, в экструдере происходит окончательное перемешивание и уплотнение материала [26].

Движение материала в экструдере при вращении шнека происходит вследствие разницы в коэффициентах трения материала о шнек и цилиндр. Основное тепло в рабочем цилиндре выделяется вследствие сжатия рабочей смеси и работы значительных сил трения ее частиц о поверхности экструдера и друг об друга. Для переработки термопластов экструдеры снабжаются дополнительными устройствами для разогрева рабочей смеси, измерения температуры и ее поддержания (нагреватели и охладители).

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

толщиной стенок, допускает использование многогнездных форм с различной литниковой системой.

2. Интрузионный метод (рис. 1.5, б). Применяется при шнековом способе пластикации полимера для получения толстостенных изделий. Его суть заключается в следующем: вращением червяка расплав в режиме экструзии подается в пресс-форму и заполняет ее, после этого червяк останавливается и осевым движением подпитывает форму, компенсируя естественную усадку остывающего расплава.

3. Интрузионно – прессовый метод (рис. 1.5, в). Используется для получения изделий значительных по площади прессования, когда заполнение формы сопровождается

существенным падением давления расплава в ее периферийных частях, что вызывает эффект разнопрочности изделия. Сущность технологии состоит в том, что практически полное заполнение формы (на первой стадии) производится интрузией при вращении шнека (рис. 1.6, б). На второй стадии (рис. 1.6, в) за счет прессового механизма узла смыкания (при остановке шнека) происходит оформление тонкостенных элементов детали. С этой целью применяются литьевые формы, конструкция которых допускает перемещение пуансона и после смыкания формы.

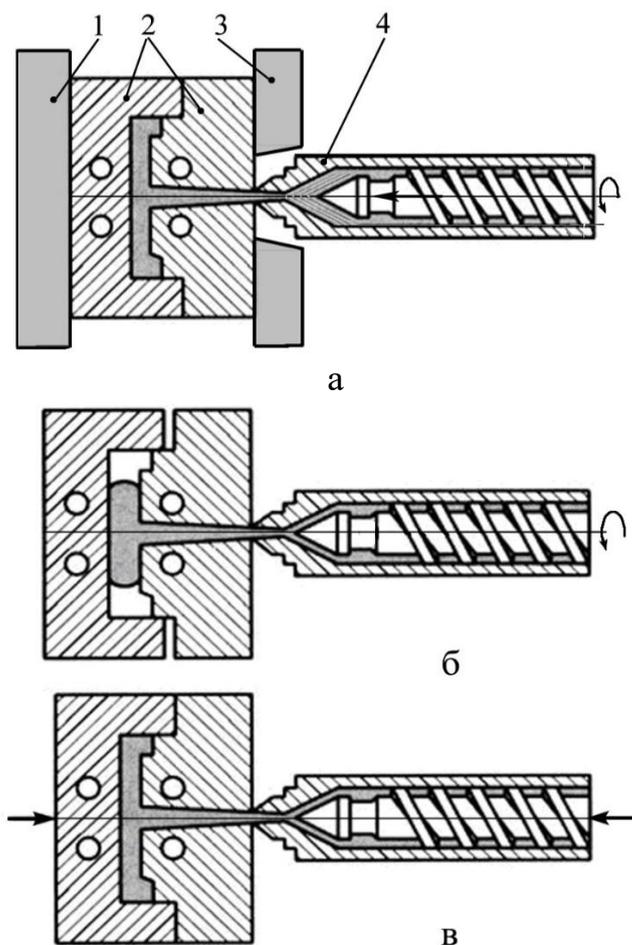
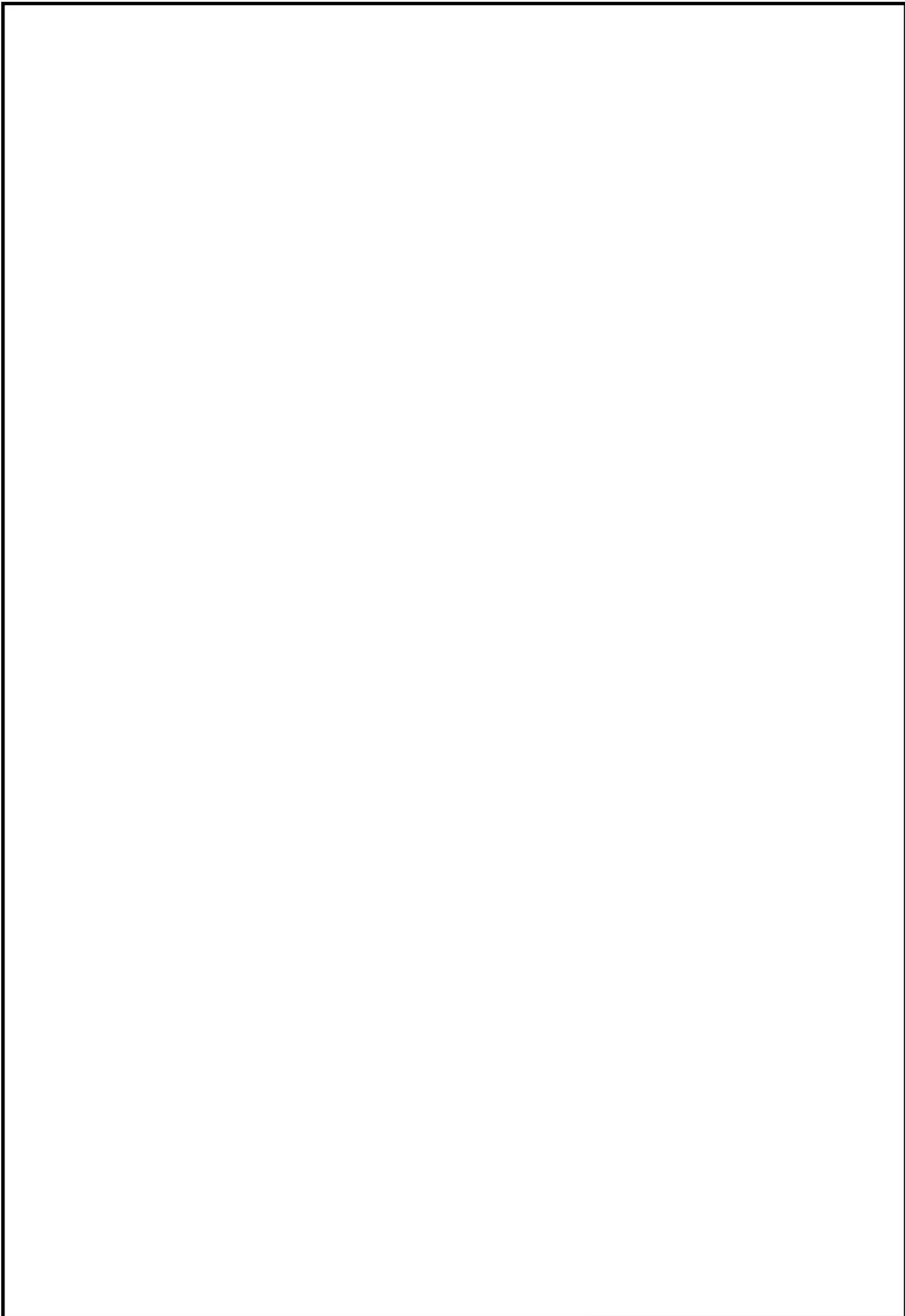


Рисунок 1.5 – Инжекционный, интрузионный (а) и интрузионно-прессовый (б, в) методы литья: 1, 3 – подвижный и неподвижный формоносители; 2 – пресс-форма; 4 – материальный цилиндр со шнеком

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

1.3 Композиционные материалы триботехнического назначения на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ)

Как уже отмечалось, на современном этапе развития машиностроения все больше металлических деталей заменяется полимерными. Данное явление связано с низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью, легкостью ремонта, низкой себестоимостью и малым весом таких деталей.

Такие детали, как опорные кольца, комбинированные уплотнения, защитные и грязесъемные кольца, в настоящее время изготавливают из полиамида и его угленасыщенных композиций. Однако данный полимер имеет существенный недостаток – низкую влагостойкость, приводящую к 3-, 4-кратному ухудшению упруго-прочностных и трибологических характеристик.

Решением данной проблемы может стать замена полиамида на другой полимер с требуемым комплексом эксплуатационных свойств. Перспективным в данном отношении может стать СВМПЭ.

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности (Ultra-high-molecular-weightpolyethylene; UHMWPE), также известный как высокомодульный полиэтилен (high-moduluspolyethylene; HMPE) или высокопроизводительный полиэтилен (high-performancepolyethylene; HPPE) является одной из разновидностей термопластичного полиэтилена. Это вещество состоит из чрезвычайно длинных цепей молекул и отличается высокой молекулярной массой - от 2 до 6 миллионов. Длинные цепочки служат для более эффективной передачи нагрузки и распределения ее внутри полимера путем укрепления межмолекулярных взаимодействий. Из этого вещества создаются очень жесткие материалы с высокой ударной прочностью. По данному показателю СВМПЭ превосходит любой термопластичный полиэтилен, промышленное производство которого сейчас налажено [31].

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности обладает высокой стойкостью к агрессивным химическим веществам, за исключением

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

окисляющих кислот, характеризуется предельно низким поглощением влаги и очень низким коэффициентом трения в условиях граничной смазки

1.3.1 Физико-механические и реологические характеристики СВМПЭ

Сегодня порошковые [порошкообразные] материалы из СВМПЭ производят компании Ticona, Braskem и Mitsui. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности доступен на рынке либо в виде уплотненных форм, таких как листы или стержни, или же в виде волокон. СВМПЭ в форме порошка может также быть непосредственно опрессован в форме конечного продукта. Благодаря устойчивости к износу и ударопрочности данного вещества промышленные применения СВМПЭ продолжают расти. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен применяется в автомобильной промышленности и при производстве тары для напитков.

СВМПЭ является одним из видов полиолефинов. Он состоит из очень длинных цепей полиэтилена, который выравнен в одном и том же направлении. Прочность вещества в значительной степени зависит от длины каждой отдельной молекулы (цепи).

Так как сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности не содержит таких химических групп, как, например, сложные эфиры, амиды или гидроксильные группы, которые восприимчивы к воздействию агрессивных химических веществ, СВМПЭ очень устойчив к воздействию воды, влаги, большинства химических веществ, ультрафиолетового излучения и микроорганизмов. При воздействии растягивающей нагрузки СВМПЭ будет непрерывно деформироваться, пока присутствует напряжение. Такой тип деформации называется ползучестью [35].

В табл. 1.2 представлены основные физико-механические свойства СВМПЭ в сравнении с полиэтиленом высокой плотности (ПЭВП)

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

Таблица 1.2. Физико-механические свойства СВМПЭ и ПЭВП [35]

№ п/п	Показатели	Метод испытания	СВМПЭ	ПЭВП
1	Плотность, кг/м ³	ГОСТ 15139-69	934	950
2	Степень кристалличности, %	По Гермаису	50	64
3	Молекулярная масса	Расчетным путем	2 млн.	0,5 млн.
4	Температура потери прочности, °С	[35, с. 30]	217	<150
5	Предел текучести при растяжении, МПа	ГОСТ 11262-80	20	25
6	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	ГОСТ 11262-80	45	25
7	Относительное удлинение при разрыве, %	ГОСТ 11262-80	450	600
8	Модуль упругости при изгибе, МПа	ГОСТ 9550-80	550	650

1.3.2 Наноразмерные и тонкодисперсные модификаторы, улучшающие упруго-прочностные и трибологические характеристики СВМПЭ

К тонкодисперсным наполнителям, снижающим коэффициент трения полимеров, относятся порошки графита, дисульфида молибдена, бронзы, некоторых селенидов и йодидов металлов. Все эти материалы являются хорошими сухими смазками. Низкий коэффициент трения этих соединений обусловлен их слоистой структурой и низкой энергией связи между слоями. При воздействии нагрузки слои движутся относительно друг друга и обеспечивают низкую силу трения[36].

Например, MoS₂ состоит из слоев, в которых атом Мо окружен четырьмя атомами серы, а слои слабо связаны между собой через атомы серы. Введение этих порошков весьма существенно снижает коэффициент трения многих полимеров (термопластов и реактопластов), особенно тех, которые характеризуются высоким его значением. Так коэффициент трения полиамида при введении 30 мас. % MoS₂ снижается с 0,4 до 0,05. Это уменьшает энергию, затрачиваемую на преодоление силы трения, и, как следствие, снижает износ полимера и тепловыделение в узле трения. Полимеры с такими добавками

можно применять без специальных жидких смазок, поскольку сами наполнители являются хорошими смазками. Исключение потребности в смазке является положительным качеством для некоторых специфических областей применения узлов трения, где попадание смазки недопустимо [41].

1.3.3 Методы совмещения углеродных нанотрубок с полимерной матрицей

С помощью направленной модификации данного полимера возможно улучшение его физико-механических и трибологических свойств. Наиболее распространенным подходом в этом отношении является введение наполнителей, например, наночастиц (таких как углеродные нанотрубки, аэросил, графит, шунгит, фуллерены и др.) [33].

В таком случае, в качестве полимерной матрицы выступает сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), а в качестве дисперсного наполнителя – углеродные нанотрубки.

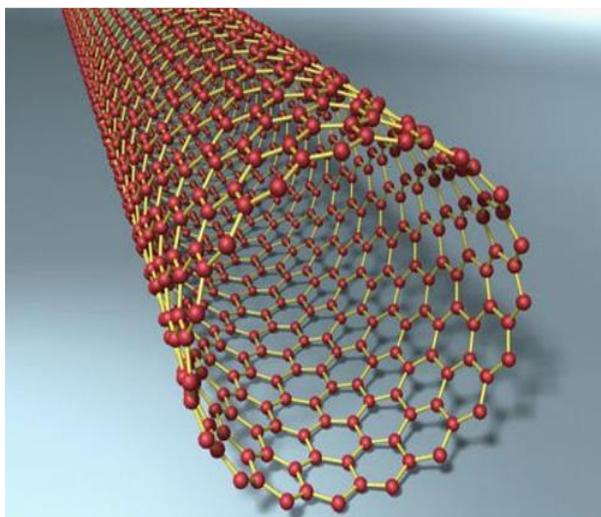
Таким образом, полученный нанокомпозит на основе СВМПЭ обладает уникальными свойствами. По прочностным показателям углеродный нанокомпозит в 3 и более раз превосходит лучшие марки углеродных материалов традиционной технологии. Он хорошо обрабатывается механически. Высокая механическая прочность в сочетании с наноразмерными дискретными элементами структуры позволяет изготавливать из него детали сложной геометрической формы с острыми кромками, полированными до высокого класса чистоты поверхности.

Основная классификация нанотрубок проводится по количеству составляющих их слоев [55].

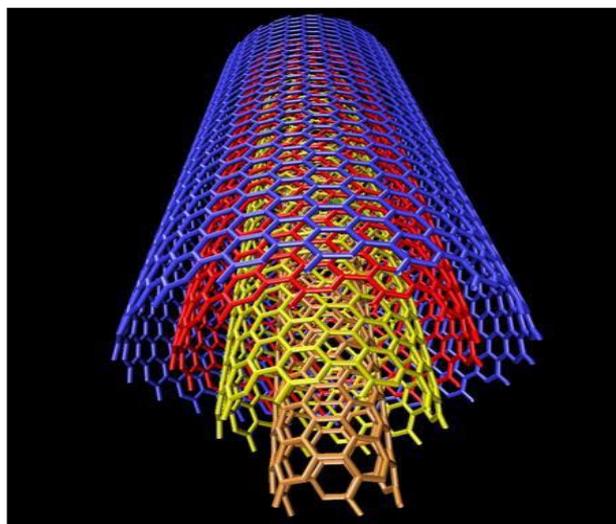
Однослойные нанотрубки (single-walled nanotubes, SNWTs) – простейший вид нанотрубок (рис. 1.6 а). Большинство из них имеют диаметр около 1 нм при длине, которая может быть во много тысяч раз больше. Структуру однослойных нанотрубок можно представить как «обертывание»

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

гексагональной сетки графита (графена), основу которой составляют шестиугольники с расположенными в вершинах углов атомами углерода, вбесшовный цилиндр.



а



б

Рисунок 1.6 – Графическое изображение однослойная углеродная нанотрубка (а) и графическое изображение многослойная углеродная нанотрубка (б)

Многослойные нанотрубки (multi-wallednanotubes, MWNTs) состоят из нескольких слоев графена, сложенных в форме трубки (рис. 1.6 б). Расстояние между слоями равно 0,34 нм, то есть такое же, как и между слоями в кристаллическом графите.

Углеродный нанокомпозит при нормальных условиях инертен практически ко всем химически активным средам. Он стоек в среде кислот, щелочей, хлорорганических соединений, расплавов цветных металлов, фторидов щелочных металлов [33].

Электрохимический потенциал углеродного нанокомпозита (+0,340 мВ) сопоставим с наиболее пассивными благородными металлами: платиной (+0,332 мВ) и золотом (+0,334 мВ).

Углеродный нанокомпозит непроницаем для жидкости и газа, работоспособен в потоке тепловых нейтронов.

Низкий коэффициент трения углеродного нанокompозита в сочетании с химической инертностью и непроницаемостью для жидких сред обеспечивает работоспособность торцевых уплотнений агрессивных сред.

Высокие физико-механические характеристики и газонепроницаемость углеродного нанокompозита, которые сохраняются до температур 2000°C, обеспечивают работоспособность высокотемпературных торцевых уплотнений энергонасыщенных узлов трения тепловых машин.

Углеродный нанокompозит обеспечивает работоспособность газодинамических подшипников. Он хорошо работает практически с любым контртелом. Рекомендуемой парой является углеродный нанокompозит – сталь ШХ15.

Известен такой способ изготовления нанокompозита одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ)/полимер (патент US 2008/0290020 A1, МПК G03F 7/16 от 27.11.08), включающий операции перемешивания углеродных нанотрубок (УНТ) в растворителе, ориентацию УНТ на фильтре методом фильтрации, изготовление полимерной матрицы, состоящей из полимера и растворителя, введение ориентированных углеродных нанотрубок в полимерную матрицу, удаление растворителя из композита и температурный нагрев композита в вакууме до температуры, большей температуры стеклования полимера. В данном способе возможно использование предварительно модифицированных УНТ химическими веществами, содержащими такие функциональные группы, как: амины, алканы, алкены, эфиры, серная, фосфорная, борная, карбоксильная кислота. Материалом полимерной матрицы может быть полиимид, полисульфон, целлюлозный ацетат, поликарбонат, полиметакрилат, другие термопластичные полимеры и другие стеклянные полимеры.

Недостатком этого способа является то, что метод фильтрации не дает достаточной ориентированности УНТ в объеме полимерной матрицы, из-за чего характеристики нанокompозита ухудшаются.

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому эффекту является Способ формирования композитов полимер/углеродные нанотрубки (патент US 2008/0306184 A1, МПК G21F 1/02 от 11.12.08), состоящих из полимерной матрицы, армированной ориентированным массивом УНТ. Согласно предложенному способу растворение полимера осуществляется в растворителе, после чего производится обработка ультразвуком находящихся в растворителе УНТ и введение ориентированных УНТ в полимерную матрицу. Из полученной смеси предлагается сформировать на подложке слой нанокompозита методом центрифугирования и обработать его ультразвуком в течение времени, достаточного для распределения УНТ по всей матрице полимера, после чего производится термообработка нанокompозита термическим методом при температуре, не выше температуры деструкции полимерной матрицы [52-54].

Причиной, препятствующей достижению технического результата, является то, что метод обработки ультразвуком не позволяет получить достаточной ориентированности УНТ в объеме полимерной матрицы, из-за чего характеристики нанокompозита ухудшаются.

Однако данные способы получения нанокompозита не подходят для работы с полимерной матрицей, в качестве которой выступает сверхвысокомолекулярный полиэтилен.

Тогда был предложен способ совмещения углеродных нанотрубок с СВМПЭ с помощью высокоэнергетической планерной мельницы, которая способствует изменению не только структуры обоих компонентов, но и влияет на физико-механические свойства нанокompозита.

1.4 Методы переработки СВМПЭ и композиций на его основе

Основными методами переработки СВМПЭ с молекулярной массой до 3,5 млн. являются литье под давлением и экструзия, а с молекулярной массой до 6млн – горячее прессование и плунжерная экструзия. Перспективным

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

методом переработки второго вида СВМПЭ считается спекание с последующим прессованием или плунжерной экструзией. Ведутся работы по созданию специализированных машин для литья под давлением этого материала. На выбор метода переработки влияют размеры детали, толщины стенки и геометрия частиц. СВМПЭ с молекулярной массой до 3,5млн. в основном перерабатывается стандартными методами – литьем под давлением и экструзией. В отличие от других термопластов, его подвергают термообработке без введения антиоксидантов или термостабилизаторов.

Широкому применению СВМПЭ с молекулярной массой до 6 млн. препятствует трудность его переработки вследствие высокой вязкости расплава. Материал не плавится при температуре выше точки плавления его кристаллической фазы (136 °С), а только переходит в вязкоэластичное состояние. Лист из СВМПЭ при температуре выше 150 °С можно сравнить с листом из мягкой резины [35].

Сначала СВМПЭ перерабатывали только одним методом – горячим прессованием – в полуфабрикаты, которые подвергали затем механической обработке до получения изделия желаемой формы. В последующем были разработаны специальные экструдеры для изготовления простых профилей, труб, стержней, прутков. Прессование в настоящее время остается основным методом переработки СВМПЭ. На его долю приходится 60%, плунжерная экструзия составляет 35%, червячная – 4%, литье под давлением – 1%. [34]

При прямом прессовании СВМПЭ помещают в нижнюю нагретую полуформу в виде порошка или предварительно отформованного брикета (таблетки). Для уменьшения разности температур между пресс формой и материалом его предварительно подогревают ~ до температуры 220 °С и предварительно подпрессовывают в пресс форме при давлении 10 МПа в течение 5 10 мин. В процессе прессования полуфабрикат должен сначала принять форму детали, затем уплотниться при 2 5 МПа в течение 2 3 ч (для деталей толщиной 30 мм). Процесс прессования происходит при температуре 200...240 °С и давлении 8...10 МПа [34].

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

Литьевое прессование заключается в нагреве СВМПЭ в специальной камере, из которой материал продавливается в пресс форму по литниковым каналам. Свойства изделий (прессованные пластины) на основе СВМПЭ определяются малой скоростью движения плунжера, применением крупных, обтекаемой формы каналов литьевого сопла. Полимер пластицируют при температурах цилиндра 250 °С и поршня 200 °С. В течение первых 6 мин давление на поршень увеличивается от 1,4 до 56 МПа. Пресс форму перед впрыскиванием материала нагревают до 126...127 °С, затем охлаждают в течение 3...8 мин, а после снятия давления вновь нагревают [34].

При переработке СВМПЭ экструзией его пластицируют при давлении 3...5 МПа в материальном цилиндре экструдера за счет вращения шнека и затем продавливают через формообразующую головку, где происходит предварительное формование изделия. Используют машины двух типов: двухшнековые (с одинаковым направлением вращения шнеков (Screwextrusion) и плунжерные (Ramextrusion). Во избежание уменьшения молекулярной массы под воздействием усилий сдвига экструзию ведут при очень низкой частоте вращения шнеков (~10 мин⁻¹). В плунжерных экструдерах полиэтиленовый порошок сжимается до образования уплотненной массы, которая в последней обогреваемой зоне цилиндра пластицируется под высоким давлением. Температура переработки составляет 180 200 °С. [34]

Фирма «*MitsuiPetrochemicalInd*» (Япония), используя метод получения СВМПЭ «*Lubmer*», перерабатывает СВМПЭ (марка *Hizex Million*) литьем под давлением при изготовлении изделий с низким коэффициентом трения (для вкладышей подшипников), а прессованием и экструзией изготавливает листы, блоки, трубы [34].

Перспективным методом переработки СВМПЭ, способным обеспечить массовое производство изделий, считают очень быстрое спекание с последующим прессованием или плунжерной экструзией. Основным элементом, позволяющим реализовать этот метод, являются смесительные лопасти *Gelimat*, разработанные фирмой «*Draiswerke*» (ФРГ), которые впервые

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

опробованы и усовершенствованы фирмой «*Carlew Chemicals*» (Канада). Установка для спекания включает горизонтальную камеру с центральным валом вращения, вокруг которого в шахматном порядке под разными углами расположены смесительные лопасти *Gelimat*, количество и положение которых определяются объемом камеры (обычно от 1 до 250 л). Скорость вращения вала очень высока, так что окружная скорость наконечника лопасти составляет 46 м/с. При такой скорости различные частички материала полностью диспергируются и гомогенизируются. В течение спекания поверхность отдельных полимерных частиц плавится при их контакте друг с другом в точках соприкосновения и таким образом получается пористый образец, готовый к формованию[34].

1.5 Методы получения самоармированных композиций СВМПЭ

В последние годы повышенный интерес исследователей применительно к проблеме упрочнения СВМПЭ вызывают так называемые самоармированные полимерные композиты (*Single-PolymerComposites – SPC*), в которых как матрица, так и армирующий наполнитель образованы на основе одного и того же термопластичного полимера. К настоящему времени в промышленном масштабе реализовано три метода получения самоармированных ПКМ на основе СВМПЭ [39]:

- 1) горячее компактирование;
- 2) горячее прессование чередующихся слоев;
- 3) совместная экструзия.

1.5.1 Горячее компактирование

Метод горячего компактирования (*hotcompaction*) разработан в Университете Лидса (Великобритания) на примере полиэтиленовых (ПЭ) волокон [41, 42]. Механизм получения самоармированных ПКМ на основе

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СВМПЭ посредством горячего компактирования представлен на рис. 1.7. Метод использует отмеченное ранее наличие для частично кристаллических полимеров интервала температуры плавления.

Данный метод обладает следующими преимуществами:

- используется только один исходный материал;
- получаемый композит характеризуется очень большой объемной долей армирующего наполнителя, что определяет высокие механические свойства композита;
- передача напряжений между матрицей и армирующими волокнами осуществляется благодаря формирующемуся в ходе процесса транскристаллическому слою;
- армирующий наполнитель равномерно распределен в матрице.

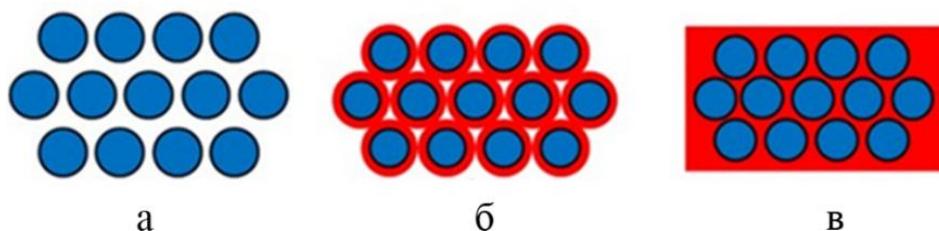


Рисунок 1.7 – Механизм горячего компактирования (армирующий компонент показан синим цветом, матрица – красным цветом): а– исходные волокна; б– плавление поверхности волокон при определенных значениях температуры и давления; в– формирование матрицы в процессе охлаждения и рекристаллизации расплава

Основным недостатком метода является очень узкий температурный диапазон обработки (как правило, $\sim 5^{\circ}\text{C}$), который представляет собой разницу между оптимальной температурой проведения процесса и температурой плавления волокон. Если температура приближается к верхней границе диапазона, слишком много волокон преобразуется в изотропную матрицу. Если температура близка к нижней границе диапазона, содержание матрицы недостаточно для связывания армирующего наполнителя по всему объему композита.

1.5.2 Горячее прессование чередующихся слоев

Данный метод заключается в расположении армирующих слоев между пленками СВМПЭ с последующей консолидацией посредством горячего прессования. Схема процесса приведена на рис. 1.8. Как правило, армирующие слои состоят из тканого материала на основе высокоориентированных кристаллических волокон или лент. Следует отметить, что плавление пленок-прекурсоров матрицы должно начинаться при более низкой температуре по сравнению с плавлением армирующих слоев. Метод характеризуется следующими преимуществами:

- большой температурный диапазон обработки;
- широкий выбор материалов;
- низкая стоимость предварительных операций [42].

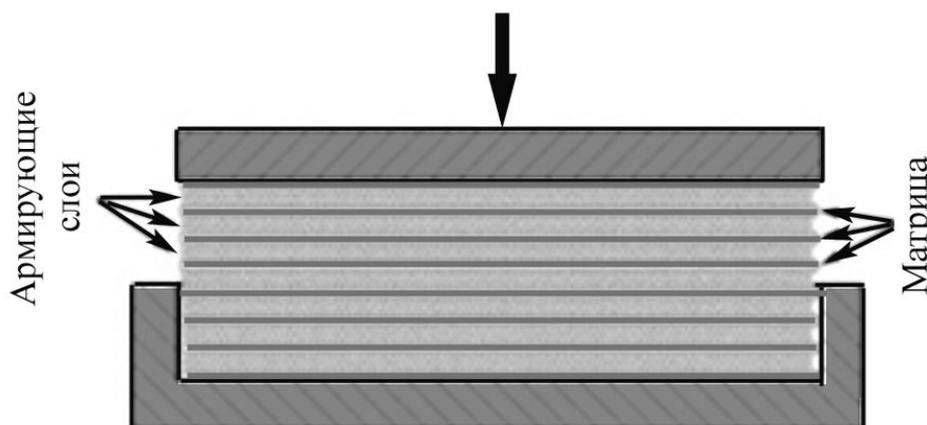


Рисунок 1.8 – Схема получения самоармированных ПКМ на основе СВМПЭ посредством горячего прессования чередующихся слоев

Указанным методом получают самоармированные ПКМ на основе ПЭ, ПП, ПЭТФ, полилактида.

Для получения самоармированных ПКМ на основе СВМПЭ указанным методом можно использовать свойство полимеров кристаллизоваться в двух или более полиморфных модификациях, характеризующихся различными механическими свойствами и температурой плавления. В частности, получен самоармированный ПКМ на основе ПП, причем материалом матрицы служила

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

β -модификация ПП, а в качестве армирующего наполнителя выступали волокна ПП α -модификации. Аналогичным образом получены самоармированные ПКМ на основе полиамида 6 и полиамида 66.

1.5.3 Совместная экструзия

Строго говоря, метод совместной экструзии относится к получению полимер-полимерных композитов, поскольку матрица и армирующий компонент различаются по химическом составу. Данный метод относится к получению бикомпонентных лент, включающих внешний слой (оболочку) и сердцевину. Внешний слой состоит из сополимера с меньшей температурой плавления по сравнению с гомополимером, из которого состоит сердцевина (как правило, в качестве гомополимера используют ПП, а в качестве сополимера – статистический сополимер пропилена с этиленом). Геометрическая форма в виде ленты считается предпочтительной по сравнению с круглым сечением волокон, поскольку снижение толщины материала приводит к снижению извитости ткани, что увеличивает ее армирующую способность. Схема процесса приведена на рис. 1.9. Для обеспечения требуемых жесткости и прочности армирующего компонента процесс включает двухстадийную операцию вытягивания. Готовые изделия получают на основе преформ различных конфигураций посредством горячего прессования. Метод совместной экструзии характеризуется следующими преимуществами:

- большой температурный диапазон обработки (20–40°C);
- высокая объемная доля армирующего компонента в ленте (до 90%).

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

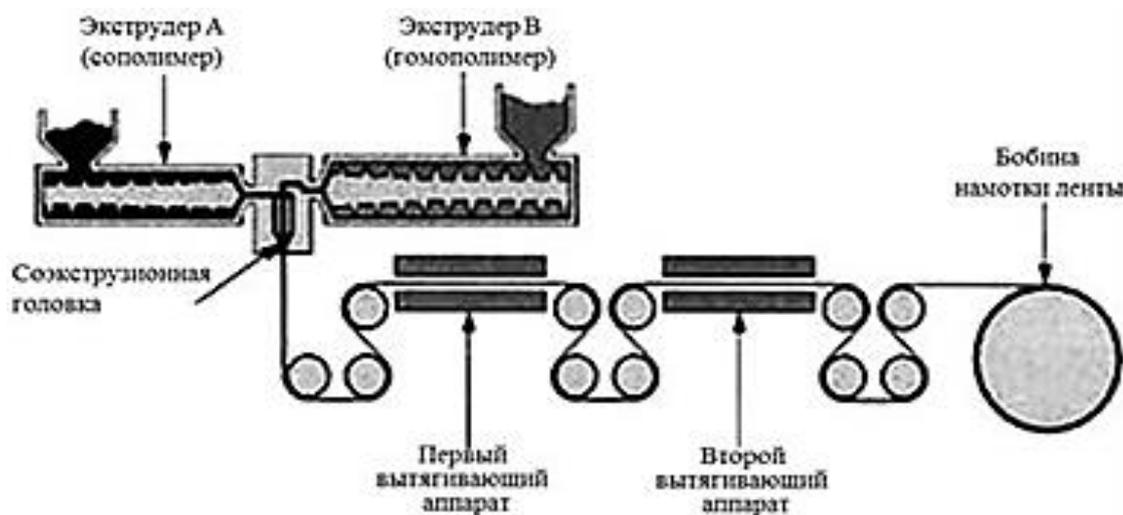


Рисунок 1.9 – Схема получения бикомпонентной ленты марки Pure® посредством совместной экструзии

1.6 Методы изучения эксплуатационных и технологических характеристик полимерных композиций

В эксплуатационных условиях работоспособность направляющих втулок, комбинированных уплотнений, защитных колец и других конструкционных изделий из антифрикционных композиций определяется в первую очередь значениями физико-механических характеристик. Прочность указанных деталей в значительной мере зависит также от технологичности композиций и правильного выбора параметров переработки гранулята.

Первое предполагает знание совокупности деформационных и прочностных свойств материала. Второе требует изучения процесса текучести материала, т.е. комплекса реологических и теплофизических характеристик, определяющих способность антифрикционных композитов к переработке методами экструзии, прессования и литьем под давлением.

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

1.6.1 Приборы и методы изучения физико-механических свойств полимерных композиций

Основой для понимания поведения материала в условиях эксплуатации являются сведения о том, как материал реагирует на механические и температурные нагрузки.

Все методы измерения механических характеристик полимерных материалов можно разделить на следующие виды.

1. Технические измерения при однократном нагружении. Такие измерения являются наиболее массовыми техническими измерениями при испытании композиционных материалов.

К этой группе относятся испытания на растяжение, сжатие, изгиб, ударную вязкость, раздир, твердость и другие, в ходе которых производится нагружение образца до разрушения или до заданного значения напряжения (деформации). Связь между напряжением, деформацией, температурой и временем проявляется в таких испытаниях в широком диапазоне деформаций обычно выражается графически в виде диаграммы «напряжение – деформация», которая, как правило, отвечает одной температуре испытания.

Наиболее предпочтительным является режим растяжения при постоянной скорости движения рабочих органов испытательной машины.

В большинстве случаев напряжение рассчитывается на исходное сечение, а деформация – по отношению к величине базового размера образца.

При испытаниях на растяжение используют три типа образцов, форма которых и условия испытаний регламентированы ГОСТ 11262-80 и ASTM D 1708-66. Образцы вырубают штанцами из плоских пластин.

В результате данных испытаний определяют модуль упругости, секущий модуль, предел текучести, максимальную деформацию, разрушающее и максимальное напряжения.

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

Для испытаний используют испытательные машины, позволяющие производить закрепление стандартного образца в зажимах, его силовое и температурное нагружение, регистрацию усилия нагружения и деформации образца, автоматическую обработку полученных результатов.

Испытания на статический изгиб регламентируются ГОСТ 4648-71. Сущность заключается в том, что образец для испытаний, свободно лежащий на двух опорах, кратковременно нагружают в середине между опорами.

В результате данных испытаний определяют изгибающее напряжение при максимальной нагрузке и модуль упругости при изгибе.

Определение твердости композиционных материалов по ГОСТ 4670-91 (метод вдавливания шарика) проводят для научно-исследовательских целей и контроля качества. Сущность метода заключается во вдавливании шарика при заданной нагрузке в поверхность образца, измерении глубины вдавливания и расчете площади поверхности отпечатка по его глубине.

Твердость по данному методу (МПа) представляет собой отношение нагрузки (Н) к площади отпечатка (мм²).

2. Технические измерения в условиях длительного нагружения.

К ним относят испытания на релаксацию напряжений, ползучесть и долговременную прочность.

3. Технические измерения в условиях динамического нагружения.

К ним относят испытания пластмасс методом вынужденных колебаний, резонансных колебаний и свободнотухающих колебаний.

4. Технические измерения триботехнических характеристик. Проводят на трибометрах с целью определения применимости пластмасс в узлах трения. В результате данных испытаний определяют: коэффициент трения и интенсивность износа при заданных значениях давления, температуры и скорости скольжения образца по контртелу. Условия испытаний регламентируются ГОСТ 11629-75 и ГОСТ 11012-69. Контртело при испытаниях на трение может представлять собой диск из стали 45 с твердостью

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

45-60 HRC₃, при испытаниях на износ – шлифовальную шкурку с эталонной истирающей способностью (регламентируется ГОСТ 11012-69).

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

1.6.2 Приборы и методы изучения трибологических свойств полимерных композиций

При исследовании трибологических свойств полимерных материалов, используемых для изготовления антифрикционных деталей (в том числе деталей силовых гидроцилиндров), работающих в условиях постоянного давления, используется режим постоянной скорости скольжения. Сила трения при этом определяется при постоянной нагрузке или деформации сжатия. В последнем случае из-за протекания релаксационных процессов контактное давление является переменным. Основными параметрами при измерении силы трения являются контактное давление, скорость скольжения и температура. Различают методы поступательного, вращательного и колебательного движения. Наиболее распространены методы, использующие вращательное движение твердой поверхности по отношению к образцу полимерного материала. Испытания пластмасс обычно проводят на приборах, предназначенных для твердых (металлических) тел.

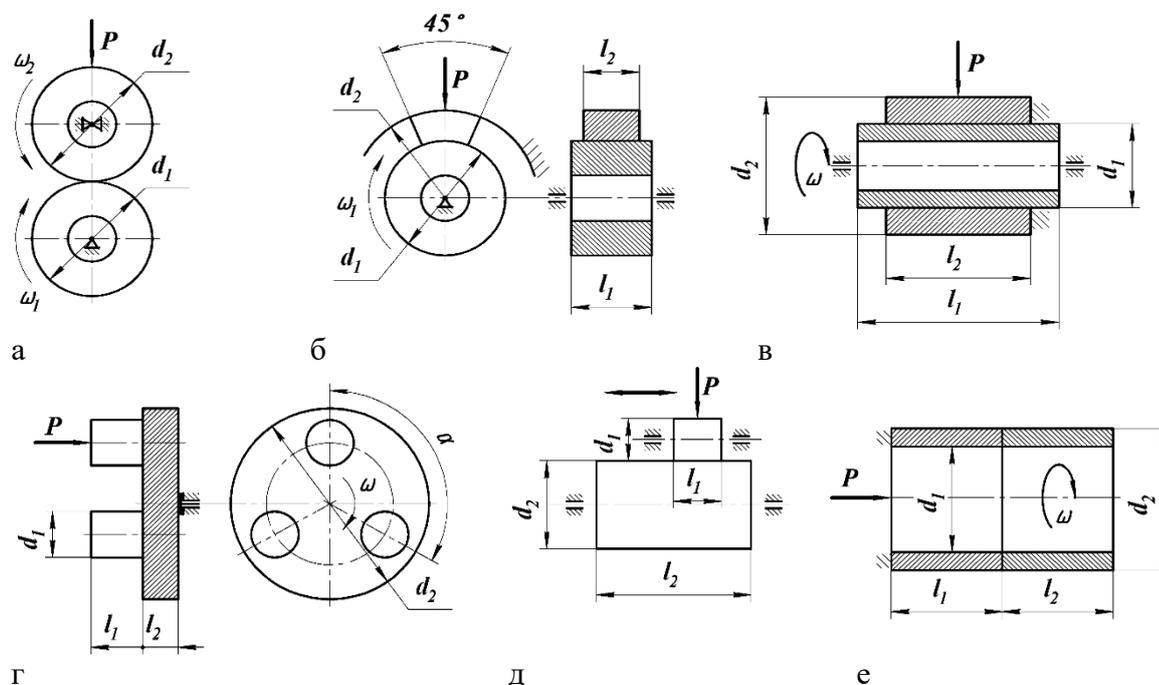


Рисунок 1.10 – Образцы и кинематические схемы трения при испытаниях: а – диск-диск; б – диск-колотка; в – вал-втулка; г – кольцо-кольцо; д – диск-палец; е – ролик-барабан

Классификация наиболее часто применяющихся кинематических схем узлов трения трибологических приборов, отличающихся коэффициентом взаимного перекрытия, представлена на рис. 1.10 [14].

1.6.3 Приборы и методы изучения реологических свойств полимерных композиций

Как известно [45,47], расплавы полимеров по реологическому поведению относятся к классу нелинейных вязкоупругих сред. У них вязкость, модуль упругости при сдвиге и другие характеристики являются функцией скорости и длительности нагружения. Принято все методы реологических измерений таких сред разделять на статические и динамические. К статическим методам относят капиллярную и ротационную вискозиметрию. К динамическим – измерения реологических характеристик при сравнительно высоких знакопеременных частотах нагружения и методы, в которых используются те или иные колебательные измерительные комплексы с сосредоточенной массой и инерцией.

Все устройства для проведения реометрических исследований согласно М. Рейнеру делятся на три класса.

1. Приборы, на которых реализуется деформация сжатия, близкая к однородной. К ним относятся сжимающие пластометры.

2. Приборы ламинарного сдвига, обработка данных на которых из-за неоднородного поля скоростей деформаций требует интегрирования или дифференцирования результатов опыта. К таким приборам относят ротационные и капиллярные вискозиметры.

3. Приборы, на которых реализуется ламинарное течение сложного вида, например, вискозиметры с падающим шариком.

Идея более распространенных ротационных вискозиметров (реометров), заключается в том, что меру сопротивления сдвиговому течению можно определить, измеряя крутящий момент и угловую скорость при относительном вращении измерительных тел. Семейство ротационных вискозиметров

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

включает в себя измерительные системы с соосными цилиндрами, конусами, дисками, сферами и комбинированные.

Ротационные вискозиметры могут работать в режимах:

а) постоянства скорости деформации $\dot{\gamma} = \text{const}$;

б) постоянства крутящего момента $M = \text{const}$.

Методики обработки результатов измерений и вычисления реологических характеристик, получаемых на данном классе приборов, представлены в работах [45, 47].

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

1.7 Цели и задачи исследования

По результатам анализа источников сформулирована цель работы – на основе теоретических и экспериментальных исследований разработать состав, технологические процессы производства и переработки и исследовать свойства антифрикционного композита на основе СВМПЭ для изготовления антифрикционных деталей силовых гидроцилиндров

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решение следующего перечня научных и технических задач.

1. Провести теоретический анализ сил, действующих в трибосопряжениях силового гидроцилиндра С100/40×200-344 трактора МТЗ 80 для установления максимальных значений контактных нагрузок.

2. Разработать конструкцию и изготовить приставку к лабораторному смесителю периодического действия *PolyLabRheomix 600 OS* для изучения трибологических характеристик антифрикционных композитов на основе СВМПЭ.

3. Разработать техпроцесс механохимической активации компонентов антифрикционных композиционных материалов на основе СВМПЭ на планетарно-шаровой мельнице «Пульверизетте-7» с установлением оптимального времени обработки.

4. Разработать составы, исследовать физико-механические, трибологические и реологические характеристики антифрикционных композиционных материалов, содержащих СВМПЭ и различные комбинации углеродных нанотрубок, а также других наноразмерных модификаторов.

5. Провести анализ полученных результатов и выделить состав с оптимальным сочетанием эксплуатационных и технологических характеристик.

6. Исследовать возможность реализации эффекта самоармирования при изготовлении модели опорно-направляющего кольца гидроцилиндра из разработанного композита.

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

7. Разработать рекомендации по применению разработанного состава антифрикционного композита на основе СВМПЭ для изготовления антифрикционных деталей силовых гидроцилиндров сельскохозяйственной техники.

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

2 МЕТОДИКИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Анализ контактных нагрузок в трибосопряжениях силового гидроцилиндра С100/40×200-344 трактора МТЗ 80

В силовых гидравлических приводах дорожной и сельскохозяйственной техники применяются гидроцилиндры, назначение которых заключается в преобразовании энергии, полученной рабочей жидкостью от насоса, в механическую энергию возвратно – поступательного действия для перемещения различных навесных и прицепных орудий.

По данным ряда исследований доля постепенных отказов, связанных с износами деталей, составляет более 70% от общего ремонтного фонда гидроцилиндров. При этом 80%-ный гамма-ресурс новых гидроцилиндров равен 5440 часов работы трактора, что в 1,5 раза ниже ресурса, заявленного заводом-изготовителем. Доминирующее влияние на надежность гидроцилиндров оказывают эксплуатационные факторы, в первую очередь, силовые взаимодействия деталей трибосопряжений.

Для определения контактных нагрузок, действующих в трибосопряжениях штока и поршня, рассмотрим условия работы силового гидроцилиндра С100/40×200 трактора МТЗ 80/82, подробно проанализированные в работе [70].

Указанный гидроцилиндр имеет следующие технические характеристики: ход поршня – $S = 200$ мм; диаметр поршня – $d_{п} = 100$ мм; диаметр штока – $d_{ш} = 40$ мм; диаметр пальца шарнира $d_{пш} = 25$ мм; максимальное давление масла – $p_{г} = 16$ МПа; тянущее усилие на штоке – $F_{гш} = 105,5$ кН; номинальная скорость движения поршня – $V_{п} = 0,15$ м/с.

На рис. 2.1 представлена схема сил, действующих на шток и поршень силового гидроцилиндра в переднем (а), промежуточном (б) и заднем (в) положениях штока.

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Из рисунка следует, что при угле 90° между осью штока 5 и рычагом 6 достигаются наиболее благоприятные условия нагружения пар трения «крышка-шток» и «поршень-гильза» из-за минимальности радиальных нагрузок, создаваемых рычагом 6 на поршень 3 и шток 5 при подъеме навесного оборудования трактора. При переходе через угол 90° наступает фаза роста радиальных нагрузок. Наибольший их уровень достигается в начальном и конечном положениях поршня. В шарнирных сочленениях A и B возникают встречные моменты трения $M_{тр}^A$ и $M_{тр}^B$, обусловленные вращением отверстий относительно пальцев. Величина моментов трения определяется значениями радиальных реакций $R_{шA}$ и $R_{шB}$ в шарнирных сопряжениях. Эти моменты трения в свою очередь определяют возникновение равных реакций со стороны крышки R_k и гильзы цилиндра $R_{ц}$, т.е. $R_{ц} = R_k = R$. Указанные реакции определяют величину сил трения $F_{тр}$ на штоке и поршне.

Значение реакции согласно указанной работе может быть вычислено по следующей формуле:

$$R = \frac{33036 f_{ш} d_{шш}}{\sin \alpha (2 f_{ш} d_{шш} + 50 + S_x)} \quad (2.1)$$

На рис. 2.2 представлены расчетные зависимости реакций шарнира $R_{шB}$, крышки и гильзы $R=R_{ц}=R_k$, силы трения между штоком и крышкой гидроцилиндра ($F_{тр}=f R$) и рабочего давления p_r гидравлической системы от хода поршня S гидроцилиндра.

Из графиков видно, что минимальные значения реакции $R_{шB}$ и давления в гидросистеме p_r достигаются при положении поршня $S = 118,2$ мм. Это связано с тем, что при данном положении поршня, угол между осью штока и рычагом навески трактора равен 90° (рис. 2.2б) и реакция шарнира $R_{шB}$ численно равна реакции подъема навески $R_{гр}$.

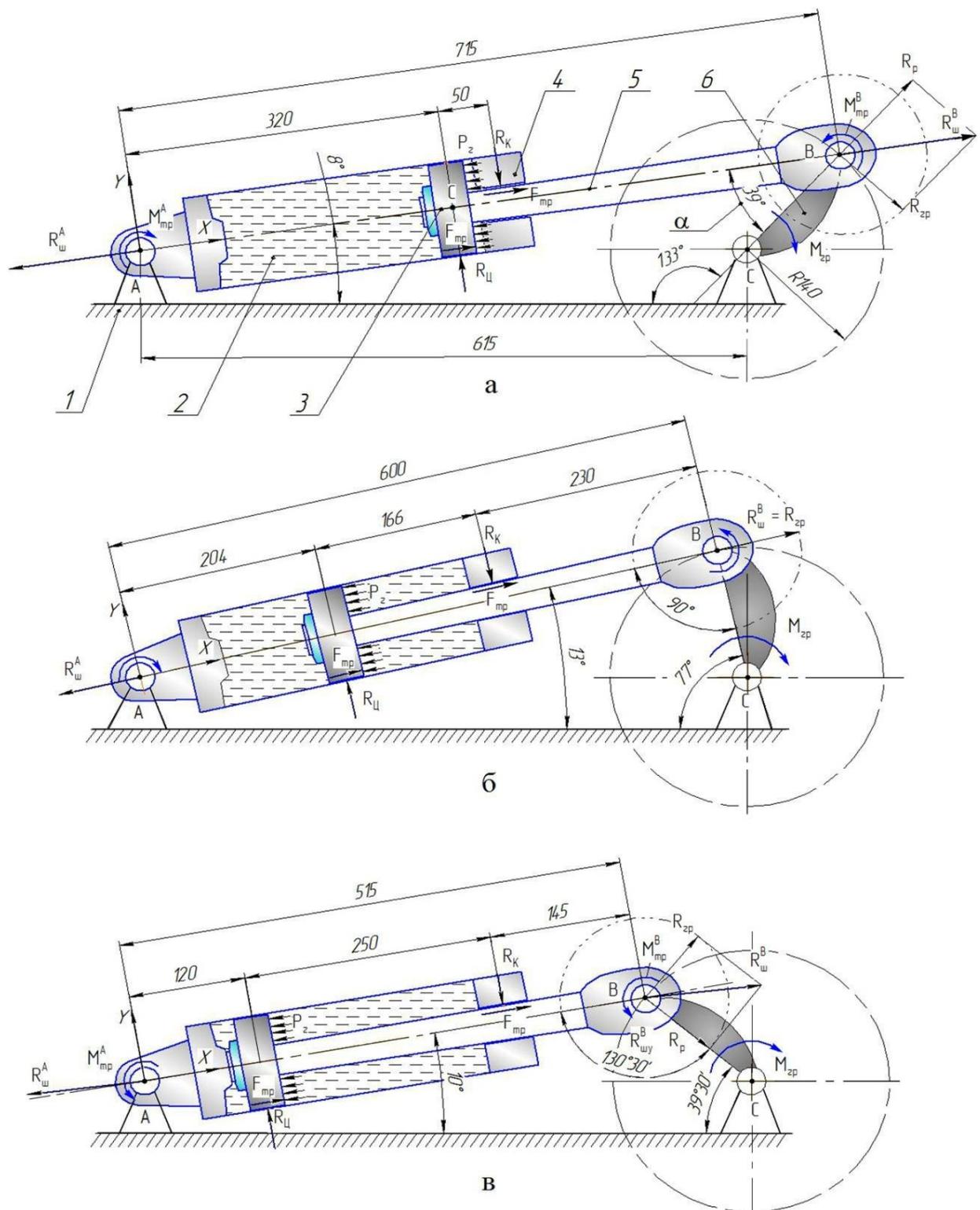


Рисунок 2.1 – Схема сил, действующих на шток и поршень гидроцилиндра в переднем (а), промежуточном (б) и заднем (в) положениях штока: 1 – плита трактора; 2 – гильза; 3 – поршень; 4 – крышка; 5 – шток; 6 – рычаг навески

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

При значениях угла между осью штока и рычагом навески трактора, отличном от 90° , гидроцилиндру необходимо преодолеть большее сопротивление для подъема навески, вследствие чего требуется большее давление в гидросистеме $p_{г}$, что в свою очередь приводит к увеличению реакции $R_{шв}$. Максимальные значения реакция $R_{шв}$ и давление в гидросистеме $p_{г}$ принимают в начале подъема навески трактора.

Минимальные значения силы трения $F_{тр}$ и реакций крышки и гильзы R достигаются при $S=175$ мм, то есть в положении,

близком концу хода гидроцилиндра при поднятии навески трактора, когда расстояние между поршнем и крышкой близко к максимальному значению. А максимальные значения силы трения $F_{тр}$ и реакций крышки и гильзы R достигаются в начале подъема навески - при максимально близком расстоянии между поршнем и крышкой.

Однако, более половины хода гидроцилиндра, при положениях поршня от 86,52 до 200 мм, величина сил реакций крышки и гильзы ($R=R_{ц}=R_{к}$) изменяется незначительно и имеет среднее значение, равное примерно 710Н. Таким образом, значения сил реакций R и сила трения $F_{тр}$ деталей штокового и

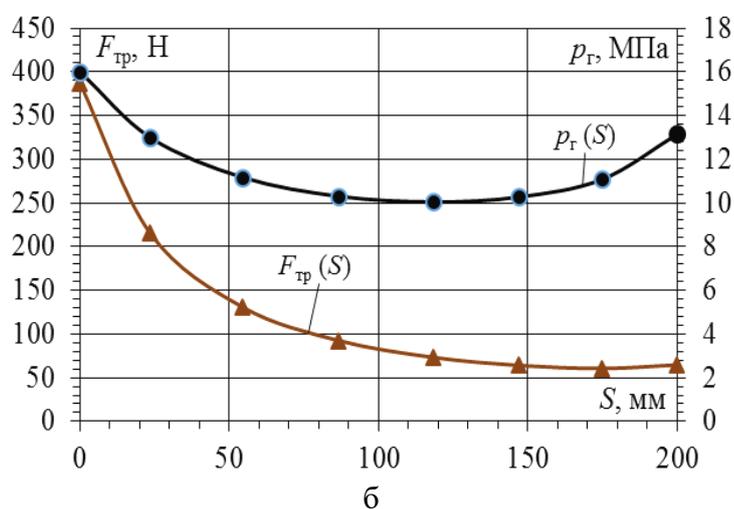
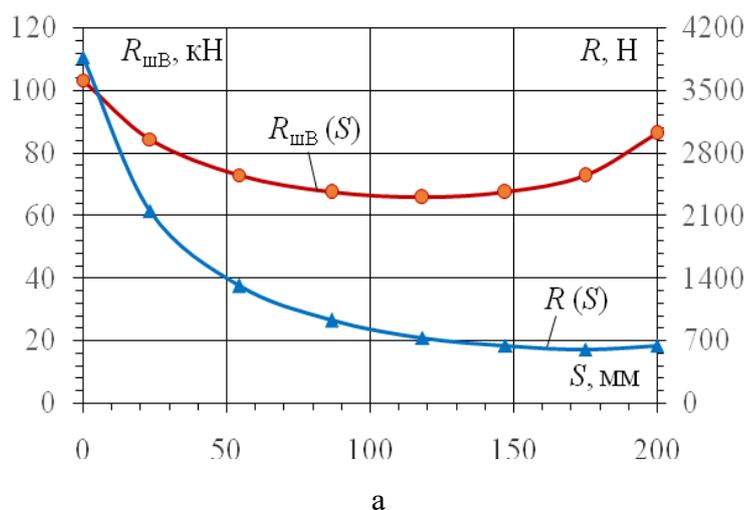


Рисунок 2.2 – Зависимость значений реакций (а), силы трения и давления в гидросистеме (б) от положения поршня

поршневого уплотнительных узлов изменяются в процессе всего рабочего цикла гидроцилиндра, что приводит к неравномерному износу рабочих поверхностей трибосопряжений.

Следуя методике П.И. Орлова [71] оценим уровень максимальных контактных напряжений в трибосопряжении «передняя крышка цилиндра – шток», величина которых вследствие меньшего диаметра сопряжения будет существенно выше, чем в сопряжении «цилиндр – поршень».

Паспортные значения: диаметр отверстия крышки $D_{кр} = 40^{+0,05}$ мм; длина области контакта крышки и штока $l = 35$ мм; диаметр штока $d_{шт} = 40_{-0,1}^{-0,032}$ мм; среднее значение зазора на диаметр $\Delta = 40,025 - 39,934 = 0,091$ мм.

Для максимального значения реакции $R_{max} = 3850$ Н (рис. 2.4) величина напряжений сжатия при отсутствии зазора составит:

$$\sigma_{сж} = R_{max} / (l \cdot d_{шт}) = 3850 / (35 \cdot 40) = 2,75 \text{ МПа}, \quad (2.2)$$

Максимальные контактные напряжения при одинаковом модуле упругости материалов согласно [71] могут быть вычислены по формуле:

$$\sigma_{max} = 0,6 k_{\sigma} (\sigma_{сж} E)^{1/2}, \quad (2.3)$$

где E – модуль упругости материалов сопряжения, МПа

Безразмерная величина k_{σ} определяется по графику (рис. 2.3), приводимому из указанного источника.

На рис. 2.4 представлена расчетная зависимость максимальных контактных напряжений от зазора между штоком и направляющей, выполненной из различных материалов: стали 45 ($E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа), чугуна СЧ15-32 ($E = 1,5 \cdot 10^5$ МПа) и полиамидного композита ($E = 3,26 \cdot 10^3$ МПа).

Из графика следует, что при отношении диаметра отверстия крышки к диаметру штока $a = 1,01$ (случай возможного износа) максимальные контактные напряжения (в случае крышки цилиндра, выполненной из чугуна) возрастают от 5 МПа до 13,7 МПа (зазор 0,4 мм). Отсюда следует, что по мере увеличения зазора между сопряженными деталями скорость изнашивания должна быстро нарастать.

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

Из анализа причин отказов силовых гидроцилиндров следует, что на их работоспособность значительное влияние оказывает силовой режим работы, который приводит к возникновению значительных реакций со стороны крышки и гильзы цилиндра. При этом величина реакций в переднем положении поршня практически в шесть раз больше реакций, реализуемых в заднем положении. Всё это приводит к возникновению в вертикальной плоскости значительных износов рабочих поверхностей сопряженных деталей и увеличению зазоров в подвижных уплотнительных узлах.

Для восстановления работоспособности и повышения долговечности силовых гидроцилиндров возможно два пути решения задачи:

- 1) восстановление изношенных поверхностей деталей в подвижных узлах нанесением антифрикционных металлопокрытий, триботехнические параметры которых превосходят триботехнические параметры материалов новых деталей;
- 2) изменение конструкции трибосопряжений путем монтажа в крышку и поршень гидроцилиндров направляющих опорных колец из износостойких

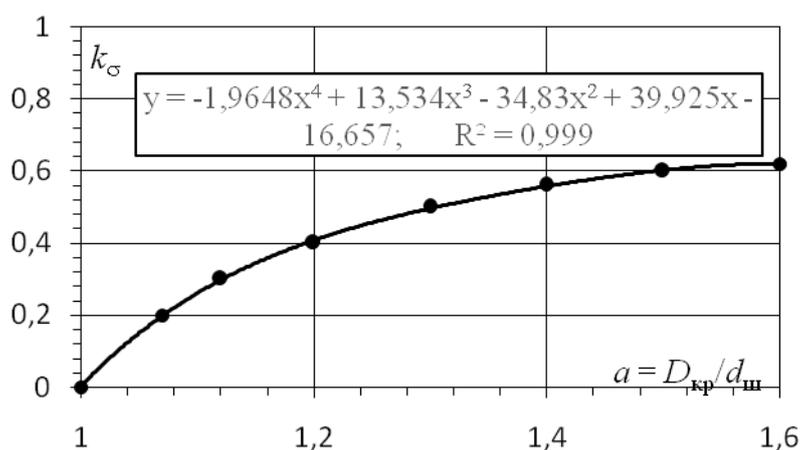


Рисунок 2.3 – Зависимость коэффициента k_{σ} от отношения диаметров, контактирующих цилиндров

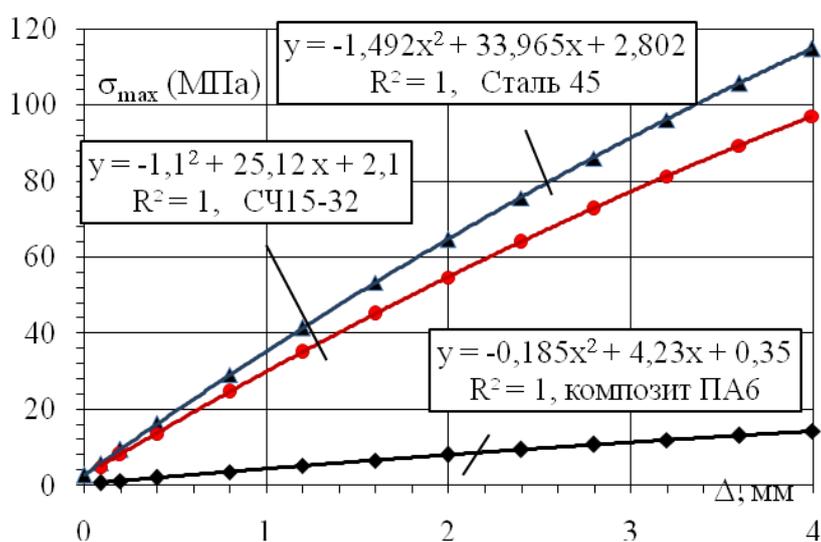


Рисунок 2.4 – Зависимость максимальных контактных напряжений от зазора между штоком и отверстием крышки

полимерных композитов, что приведет к значительному снижению интенсивности изнашивания деталей ресурсопределяющих сопряжений и снижению трудоемкости ремонта гидроцилиндров.

2.2 Разработка конструкции трибометрической приставки к лабораторному смесителю периодического действия *PolyLabRheomix 600 OS*

Основной целью данной разработки было создание трибометрической приставки со схемой истирания «диск – колодка», в которой кроме трибометрических испытаний реализуется возможность предварительного формования полимерного образца (колодки), имеющего истираемую поверхность, точно соответствующую поверхности контртела (диска). Данная возможность может быть реализована при использовании лабораторного смесителя периодического действия *PolyLabRheomix 600 OS*.

Внешний вид лабораторный смеситель Rheomix 600 OS представлен на рис. 2.5, внешний вид разработанной трибометрической приставки – на рис. 2.6

Электрообогреваемый лабораторный смеситель предназначен для компаундирования, смешения и тестирования полимеров, эластомеров, керамики и других материалов. Камера смешения состоит из трех секций с отдельным температурным контролем (передняя панель, центральная камера и задняя панель). Смеситель имеет простую смену роторов, систему безопасности для чистки двумя руками. Сменные втулки для разных температур и применений. Управление по шине CANopen.

Технические характеристики: объём камеры - 120 см³; материал – нержавеющая сталь 1.4301; максимальный крутящий момент – 160 Nm; защита от перегрузки – электрическая; максимальная скорость – 250 min⁻¹; соотношение скоростей роторов – 3:2; максимальная температура – 400 °C; число зон – 3 (нагрев / охлаждение); охлаждение – 1 магнитный вентиль (сжатый воздух).

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
						56
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

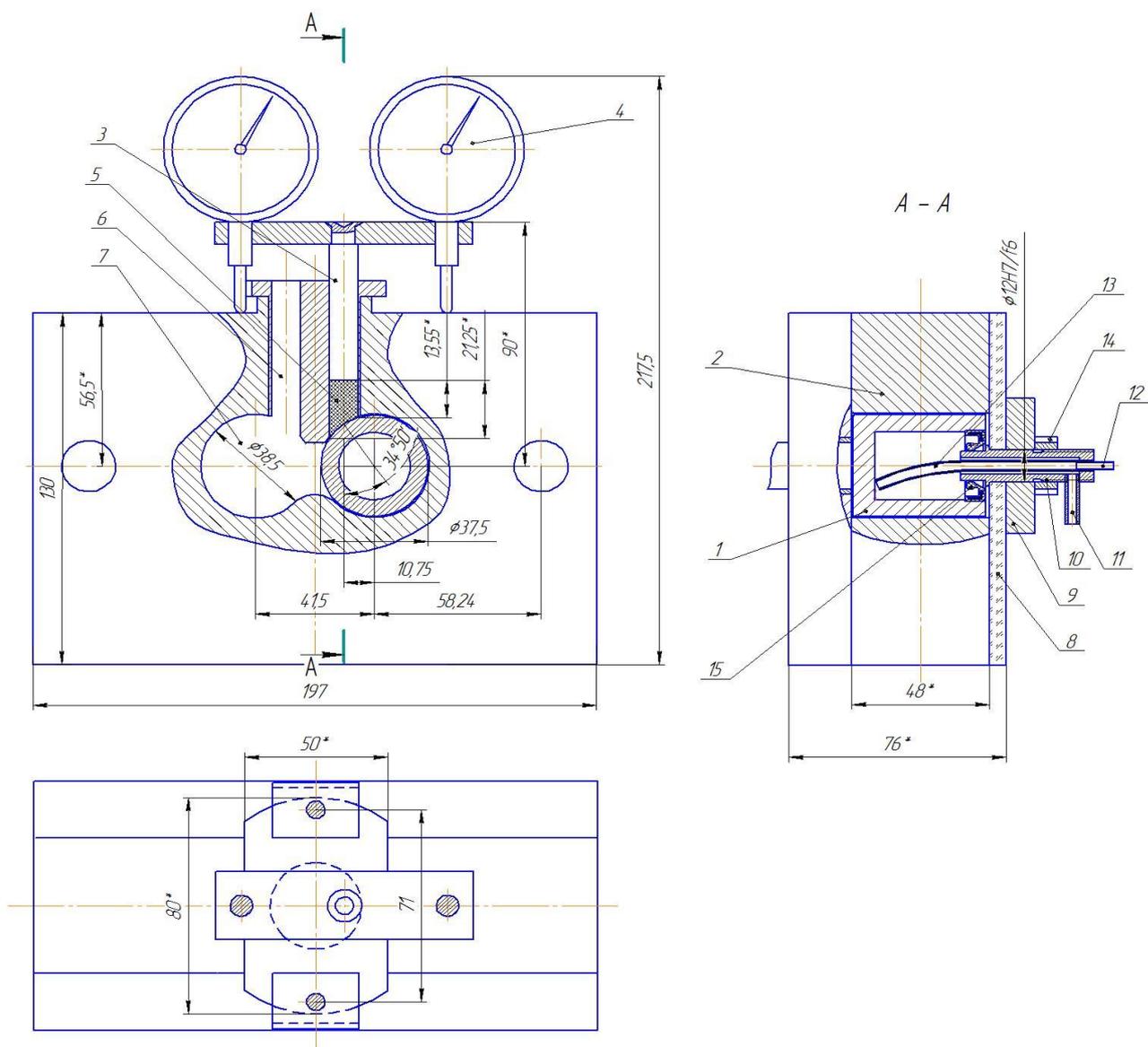


Рисунок 2.6 – Принципиальная схема разработанной трибометрической приставки к смесителю *HAAKE PolyLabRheomix 600 OS*: 1 – ротор-контртело; 2 – вкладыш; 3 – плунжер; 4 – индикаторы изнашивания; 5 – испытуемый образец; 6, 7 – каналы подачи масла; 8 – передняя панель; 9 – накладка; 10 – втулка; 11, 12 — штуцера ввода и вывода охлаждающей воды; 13 – полимерная трубка для подачи охлаждающей воды; 14 – гайка; 15 – радиальное уплотнение.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

МД-02069964-35.04.06-60-18

Лист

58

2.3 Теоретический анализ сил, действующих на образец при его эксцентричном расположении относительно ротора трибометрической приставки

Расчетная схема нагружения образца представлена на рис. 2.7.

1. Уравнения равновесия для образца в канале. Сумма проекций всех сил, действующих на образец, на оси x и y :

$$\begin{aligned} \Sigma(F_i)_x &= -F_p \cos \alpha + R_k - R_p \sin \alpha = \\ &= -R_p \sin \alpha - f_p R_p \cos \alpha + R_k = \\ &= -R_p (\sin \alpha + f_p \cos \alpha) + R_k = 0; \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \Sigma(F_i)_y &= R_p \cos \alpha - F_p \sin \alpha - F + \\ &+ F_k = R_p \cos \alpha - F_p \sin \alpha - F + f_k R_k = \\ &= R_p \cos \alpha - f_p R_p \sin \alpha - F + f_k R_k = \\ &= R_p (\cos \alpha - f_p \sin \alpha) - F + f_k R_k = 0, \end{aligned} \quad (2.5)$$

где F_p - тангенциальное воздействие на образец, создаваемое ротором, Н; R_k - реакция стенки канала, Н; R_p - равнодействующая распределенной нагрузки на образец со стороны ротора, Н; $\alpha = 34,8^\circ$ - угол наклона к оси y вектора равнодействующей нагрузки; $f_p = F_p / R_p$ - коэффициент трения ротора по образцу; F - внешнее усилие на образец, создаваемое плунжером, Н; F_k - сила трения образца о стенку канала, Н; f_k - коэффициент трения образца по стенке канала, численно равный трению покоя.

Из выражения (2.4) следует, что

$$R_k = R_p (\sin \alpha + f_p \cos \alpha) \quad (2.6)$$

Подставляя (3) в выражение (2), имеем:

$$R_p (\cos \alpha - f_p \sin \alpha) - F + f_k R_p (\sin \alpha + f_p \cos \alpha) = 0$$

$$R_p (\cos \alpha - f_p \sin \alpha + f_k \sin \alpha + f_k f_p \cos \alpha) = F$$

$$R_p = \frac{F}{\cos \alpha (1 + f_p f_k) - \sin \alpha (f_p - f_k)} = \frac{F / \cos \alpha}{(1 + f_p f_k) - \operatorname{tg} \alpha (f_p - f_k)}$$

Вычисляя значения тригонометрических функций, получаем:

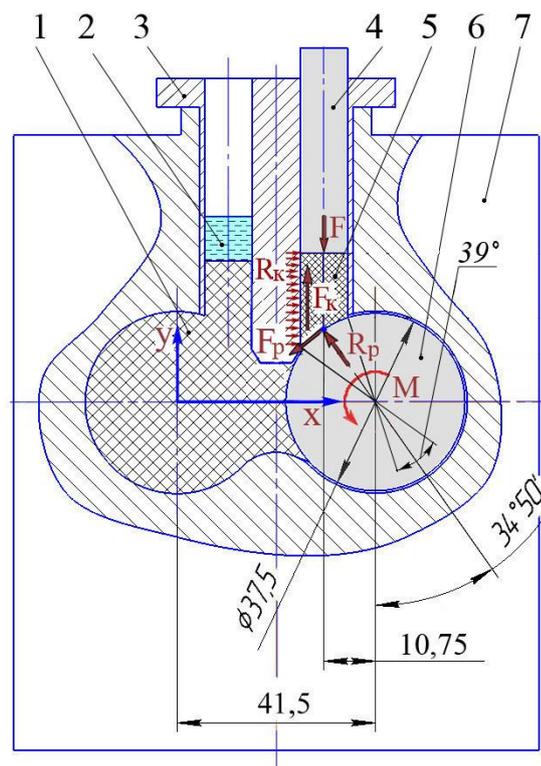


Рисунок 2.7 – Расчетная схема трибометра: 1 – губка; 2 – масло; 3 – вкладыш; 4 – плунжер; 5 – образец; 6 – ротор (контртело); 7 – корпус

$$R_p = \frac{1,218F}{1 + f_p f_k - 0,696(f_p - f_k)} \cong 1,218 F. \quad (2.7)$$

2. Коэффициент трения ротора по образцу:

$$f_p = \frac{F_p}{R_p} = \frac{2M[1 + f_p f_k - 0,696(f_p - f_k)]}{37,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,218F} =$$

$$= 43,8 \frac{M}{F} [1 + f_p f_k - 0,7(f_p - f_k)] \approx 43,8 M/F \quad (2.8)$$

$$f_p \frac{F}{M} = \frac{2[1 + f_p f_k - 0,696(f_p - f_k)]}{37,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,218} = 43,788[1 + f_p f_k - 0,696(f_p - f_k)]$$

$$f_p \left(\frac{F}{M} - 43,788 f_k + 30,476 \right) = 43,788 + 30,476 f_k.$$

$$f_p = \frac{43,8 + 30,5 f_k}{F/M - 43,8 f_k + 30,5} \quad (2.8a)$$

Принимая $f_p = f_k$ получаем следующее уравнение:

$$f_p^2 - 2,28 \cdot 10^{-2} \frac{F}{M} f_p + 1 = 0, \text{ из которого следует, что}$$

$$f_p = 1,14 \cdot 10^{-2} \frac{F}{M} \pm (1,3 \cdot 10^{-4} F^2 / M^2 - 1)^{0,5} \quad (2.8b)$$

3. Величина контактного давления на образец в зоне трения (Па):

$$p = \frac{R_p}{3,14ab} = \frac{1,218F}{3,14 \cdot 0,0064 \cdot 0,005} = \frac{12120F}{1 + f_p f_k - 0,7(f_p - f_k)} \cong$$

$$\cong \frac{12120F}{1 + f_p^2} \approx 12120F,$$

где $a = 1/2(\pi D_p \cdot 39^\circ / 360^\circ) = 1/2(3,14 \cdot 0,0375 \cdot 39^\circ / 360) = 0,0064$ м – большая полуось эллипса; $b = 0,005$ м – малая полуось эллипса.

4. Скорость скольжения в зоне контакта образца и ротора (м/с):

$$V = \pi D_p n / 60 = 0,0375 \pi n / 60 = 1,96 \cdot 10^{-3} n, \quad (2.10)$$

где n – частота вращения ротора, об/мин; $D_p = 0,0375$ – диаметр ротора, м.

2. Уравнение равновесия ротора относительно оси вращения:

									Лист
									60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	МД-02069964-35.04.06-60-18				

$$\begin{aligned} \Sigma M(F_i) &= -10,75 \cdot 10^{-3}(F - f_k R_k) + 0,5 \cdot 37,5 \cdot 10^{-3} F_{\text{тр}} - M = 0; \\ F_{\text{тр}} &= \frac{M + 10,75 \cdot 10^{-3}(F - f_k R_k)}{0,5 \cdot 37,5 \cdot 10^{-3}} = 53,3[M + 10,75 \cdot 10^{-3}(F - f_k R_k)] = \\ &= 53,33M + 0,573(F - f_k R_k), \end{aligned} \quad (2.11)$$

где M – крутящий момент на роторе, развиваемый приводом, Нм; $F_{\text{тр}} = -F_p$ – сила трения, действующая на ротор со стороны образца, Н.

Подставляя в (2.11) выражение (2.6) для R_k , получаем для силы трения в области контакта ротора и образца следующее выражение:

$$\begin{aligned} F_{\text{тр}} &= 53,33M + 0,573(F - f_k R_k) = 53,33M + 0,573[F - f_k R_p (\sin \alpha + \\ &+ f_p \cos \alpha)] = 53,33M + 0,573[F - f_k R_p (0,571 + 0,821 f_p)]. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Коэффициент трения

$$\begin{aligned} f_p &= \frac{F_{\text{тр}}}{R_p} = \frac{53,33M + 0,573[F - f_k R_p (0,571 + 0,821 f_p)]}{R_p} = \frac{53,33M + 0,573F}{R_p} - \\ &- 0,327 f_k - 0,470 f_p f_k = \frac{53,33M + 0,573F}{1,22F} - 0,327 f_k - 0,470 f_p f_k. \end{aligned}$$

$$f_p = (43,71 \frac{M}{F} + 0,470)[1 + f_p f_k - 0,7(f_p - f_k)] - 0,327 f_k - 0,470 f_p f_k \quad (2.13)$$

Изменение высоты образца вследствие износа равно

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{A} = \frac{\Delta m / \rho}{\pi ab} = \frac{\Delta m / \rho}{\pi(0,0064 \times 0,005)} = 10^4 \frac{\Delta m}{\rho} [\text{м}], \quad (2.14)$$

где Δm – изменение массы образца за время t (мин), кг; ρ – плотность материала образца, кг/м³; A – площадь контакта образца с контртелом (ротором), м.

Путь трения

$$S = \pi D_p n t, \quad (2.15)$$

где $D_p = 0,0375$ – диаметр ротора, м; n – частота вращения ротора, об/мин; t – время эксперимента, мин.

Интенсивность износа образца полимера (мм/мм пути) может быть рассчитана по следующей формуле

$$I = \frac{\Delta h}{S} = 10^4 \frac{\Delta m / \rho}{\pi D_p n t} \quad [\text{отн. ед}], \quad (2.16)$$

									Лист
									61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	МД-02069964-35.04.06-60-18				

2.4 Методика триботехнических испытаний композитов на трибометрической приставке к смесителю *HAAKE PolyLabRheomix 600 OS*

Сравнительные триботехнические испытания были проведены применительно к СВМПЭ, полиамиду (ПА 6) и коммерческому угленаполненному полиамиду (УПА 6-15)

Для испытаний была использована вышеописанная приставка к лабораторному смесителю периодического действия *PolyLabRheomix 600 OS*.

Образцы для испытаний (рис. 2.8) формовались непосредственно на указанной приставке при температуре 170°C с выдержкой под давлением 5 МПа в течение 10 мин с последующим воздушным охлаждением до температуры 80 °С. Давление на плунжер 4 (рис. 2.7) создавалось запорным механизмом смесителя (с коэффициентом умножения усилия 8) путем навешивания груза 5 кг на рукоятку штурвала (рис. 2.5а).

Суммарная площадь контакта ротора (рис. 2.8) с образцом композита составляла 100 мм², контактное давление на образец – 0,1 МПа. Температура испытаний составляла 20 °С, скорость



а



б

Рисунок 2.8 – Внешний вид вкладыша и сформованного образца для испытаний (а) и ротора-контртела (б) после испытаний

варьировалась от 0,1 до 0,5 м/с. Эксперименты проводились в условиях сухого и жидкостного (в масле марки И-20А) трения. Значение момента трения выводилось на управляющий компьютер.

По данной методике для каждой температуры было испытано по три образца от каждого состава композита. За результат принимали среднее арифметическое значение трех испытаний.

Статистическая обработка результатов с построением трендов производилась в программе «*Microsoft Excel*».

Коэффициент трения определяли по формуле (2.13). Интенсивность изнашивания рассчитывалась по формуле (2.16).

2.5 Методика механохимической активации композиций СВМПЭ с наноразмерными модификаторами на планетарно-шаровой мельнице «Пульверизетте-7»

Целью исследования было выявление закономерностей влияния механохимической активации полимерного связующего (СВМПЭ) и композиций СВМПЭ + 0,1 % УНТ на физико-механические и реологические свойства полимерных композитов.



Рисунок 2.9 – Лабораторная планетарная

						Лист
					МД-02069964-35.04.06-60-18	63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

В работе использовали СВМПЭ шаровая мельница «Пульверизетте-7» фирмы «Tisona» (Германия) с молярной массой составляет 5млн единиц и композиционные материалы на его основе.

Механическую активацию композиций СВМПЭ проводили в планетарно-шаровой мельнице «Пульверизетте-7», обеспечивающей ускорение и позволяющей проводить одновременную механическую обработку (плюс перемешивание) до 30 грамм порошковой смеси. В качестве переменного параметра механообработки была принята длительность механоактивации.

Внешний вид планетарно-шаровой мельнице «Пульверизетте-7» представлен на рис.2.9. Внешний вид чаш – на рис.2.10 а.

Назначение: тонкое измельчение различных материалов в периодическом режиме мокрым или сухим способом.

Характеристики: принцип работы – удар; измельчаемые типы материалов – твердый, среднетвердый, хрупкий; количество мест для размольных стаканов – 2; размеры размольных стаканов – 80 мл; стакан и крышка выполнены единым блоком; позиционирование и фиксация стаканов, открытие и закрытие камеры – автоматически; полный демонтаж крышки камеры измельчения; автоматическая проверка параметров перед каждым измельчением; программирование режима работы – с помощью сенсорного экрана; мониторинг тепловых эффектов, физических и химических реакций – с помощью EasyGTM-системы, разработанной на основе измерения давления газов и температуры в стакане в процессе измельчения.

Технологический процесс механохимической активации включал следующие стадии: взвешивание композиции СВМПЭ с наноразмерными модификаторами; закладка композиции в размольный стакан с мелющими стальными шарами. Программный режим работы – ускорение 1000 об/мин, время выдержки 15мин, время покоя – 15мин, количество циклов- 1-7 (рис.2.10 б).

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64



а



б

Рисунок 2.10 – Внешний вид размольного стакана из закаленной стали с уплотнительным кольцом и крышкой объемом 80 мл (а) и внешний вид готовой композиции после механаактивации (б)

2.6 Методика компрессионного формования пластин для физико-механических и реологических испытаний на лабораторном прессе *GT-7014-H50C*

Целью экспериментальных исследований были настройка и отработка режимов производства тонкостенных пластин из термопластичных композиционных материалов методом компрессионного формования на лабораторном гидравлическом прессе.

Внешний вид пресса представлен на рис. 2.11. Внешний вид пресс-формы – на рис. 2.12

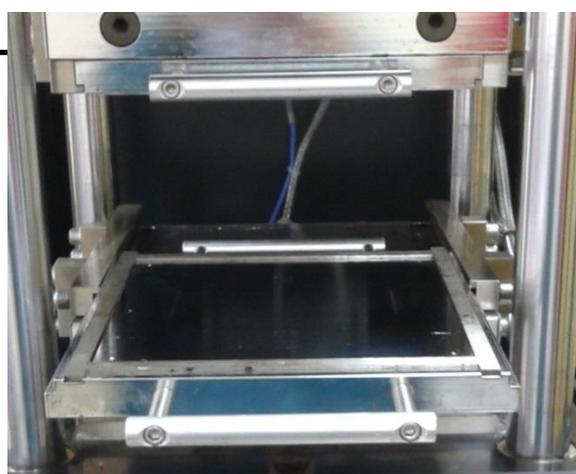
Назначение: горячее формование порошка, гранулята в изделия.

Технические характеристики:
диаметр колонн рамы – 60 мм;
максимальное усилие – 20 т; плиты – изолированные хромированные стальные 250x250 мм; нагрев плит – электрический; контроль температуры плит с разрешением 1 °С; диапазон температурного регулирования – 20...250 °С; охлаждение плит – встроенное водяное; максимальный ход нижней плиты – 200 мм; автоматическое управление прессом – на основе PLC-контроллера с сенсорным дисплеем; возможности программирования автоматизированных производственных циклов; цифровая система регулировки давления; возможность использования стационарных и съемных пресс-форм; наличие системы выдвижения пресс-форм; рабочая зона пресса защищена экраном для снижения теплопотерь и обеспечения безопасности персонала; габариты – (ШхДхВ) 1100x550x1650 мм; вес – 520 кг.



Рисунок 2.11 – Внешний вид лабораторного гидравлического пресса фирмы «Gibitre» (Италия), снабженного системами нагрева и охлаждения плит

Технологический процесс компрессионного формования пластин включал следующие стадии: взвешивание композиции ; нагрев пресс-формы до температуры 180°C; закладка композиции в полость пресс-формы и смыкание пресса; плавление композиции при усилении 5 МПа в течение 15 мин; охлаждение пресс-формы до 50°C проточной водой, подаваемой в каналы нагревательных плит, при усилении пресса 5 МПа; размыкание пресса и пресс-формы, выемка изделия и удаление облоя.



б

Рисунок 2.12 – Внешний вид лабораторного гидравлического пресса фирмы «Gibitre» (а) и смонтированной на прессе двухплитной (б) пресс-формы для формования тонкостенных (200×20×1,1 мм) пластин

2.7 Методики исследования технологических и эксплуатационных характеристик композитов СВМПЭ

2.7.1 Методика исследования упруго-прочностных характеристик композитов на испытательной машине UAI-7000

Для испытаний на растяжение (ГОСТ 11262-80) использовались образцы размером 150 × 20 × 1,1 мм, вырубленные штанцем из формованных пластин 200 × 200 × 1,1 мм.

Образцы имели гладкую ровную поверхность, без сколов, трещин, раковин и других видимых дефектов. Образцы согласно требованиям ГОСТ 12423-66 кондиционировались в течение 24 часов при температуре 23 ± 2 °С и относительной влажности 50 ± 5 %. Испытание образцов на растяжение проводили на разрывной машине UAI-7000 M (см. рис. 2.13) при температуре 23 ± 2°C и скорости движения зажимов 10 мм/мин.

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	МД-02069964-35.04.06-60-18					67

Клиновидные захваты *UMB1T* машины обеспечивали надежное крепление образцов и совпадение продольной оси образца с направлением растяжения (рис. 2.14). Перед испытанием толщину и ширину образцов измеряли в трех местах (в середине и на расстоянии 5 мм от крайних меток), находили средние арифметические значения, по которым вычисляли значение площади поперечного сечения A_0 . Образцы закрепляли в испытательной машине с равномерной затяжкой захватов для исключения их проскальзывания при испытаниях, не допуская при этом разрушения образцов в местах закрепления.

Расчет значений вели по пяти образцам. Образцы, которые в процессе испытания разрушались за пределами рабочей части, или у которых в процессе испытания были обнаружены дефекты (пузыри, включения, внутренние трещины и т.п.), в расчет не принимались.

Значения предела прочности (МПа) вычисляли по формуле:

$$\sigma = F_{\max} / A_0, \quad (2.17)$$

где F_{\max} – максимальная нагрузка при испытании на растяжение, Н; A_0 – начальное поперечное сечение образца, мм².

Назначение: испытания полимеров на растяжение, сжатие, сдвиг, релаксацию напряжений, ползучесть.

Технические характеристики:
 максимальное усилие – 2000 кг;
 точность фиксации нагрузки – ±0,25%; скорость нагружения – 0,001...1000 мм/мин; точность измерения скорости – ±0,5%; разрешение перемещения – 0,0001 мм; температурный диапазон испытания –60...+250 °С; точность



Рисунок 2.13 – Испытательная машина UAI-7000 М с термокамерой и компьютерным управлением

поддержания температуры – $\pm 2^{\circ}\text{C}$; разрешение по нагрузке – $1/200000$; ход без захватов – 1100 мм; точность по скорости – $\pm 0.5\%$; разрешение по ходу – $\pm 0.5\%$; эффективная ширина – 410 мм.

Относительное удлинение (%) при максимальной нагрузке (ε_{\max}) вычисляли по формуле:

$$\varepsilon_{\max} = 100 \Delta l_{\max} / l_0 \quad (2.18)$$

где Δl_{\max} – изменение расчетной длины образца в момент достижения максимальной нагрузки, мм; $l_0 = 50$ – начальная расчетная длина образца, мм.



а



б

Рисунок 2.14 – Внешний вид захватов машины и форма образца при испытаниях на растяжение (а) и сжатие (б).

Модуль упругости при растяжении (МПа) определяли по формуле:

$$E_p = \frac{(F_2 - F_1) \cdot l_0}{A_0 \cdot (\Delta l_2 - \Delta l_1)} \quad (2.19)$$

где F_2 – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,3%, Н; F_1 – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,1%, Н; Δl_2 – удлинение, соответствующее нагрузке F_2 , мм; Δl_1 – удлинение,

соответствующее нагрузке F_1 , мм. Статистическую обработку результатов испытаний проводили с использованием программы «*Microsoft Excel*».

Исследование поведения образцов при сжатии с определением прочности при сжатии, модуля упругости и других характеристик, получаемых на основании кривой "напряжение – относительная деформация", также проводили на испытательной машине UAI-7000 при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$ и скорости движения захватов 0,5 мм/мин. При испытании цилиндрический композиционный образец размещали между захватами С-1Т испытательной машины (рис. 2.14 б).

2.7.2 Методика исследования реологических характеристик расплавов композитов в динамическом режиме вынужденных колебаний на реометре HAAKE MARS III

Реологические испытания были проведены для расплавов СВМПЭ и композита СВМПЭ + 0,1% УНТ на реометре *Haake MARSIII* (рис. 2.15). Для исключения нарушения сплошности расплава в рабочем зазоре измерительной системы реометра *Haake MARSIII* испытания проведены в динамическом режиме с использованием измерительной системы «плоскость-плоскость» с диаметрами ротора и плоскости 20 мм. Амплитуда осцилляций ротора составляла 0,001 рад., диапазон частот – 0...80 Гц, диапазон температур расплава – 240...260 °С, рабочие зазоры между рифлеными плоскостями измерительной системы (рис. 2.16) принимались в соответствии с толщиной образцов (дисков диаметром 20 мм, толщиной 1,1 мм,



Рисунок 2.15 – Внешний вид измерительной системы реометра *Haake MARSIII* с рифлеными рабочими плоскостями

вырубленных штанцем из пластин) и составляли 1 мм. Согласно соотношениям Кокса-Мерца [55] указанные испытания эквивалентны испытаниям с вращающимся ротором, если угловая скорость осциллирующего ротора соответствует скорости сдвига расплава, достигаемой при вращении ротора. При обработке результатов, полученных для различных температур, использован принцип температурно-временной суперпозиции Больцмана, реализованный в программе *RheoWinTTS*.

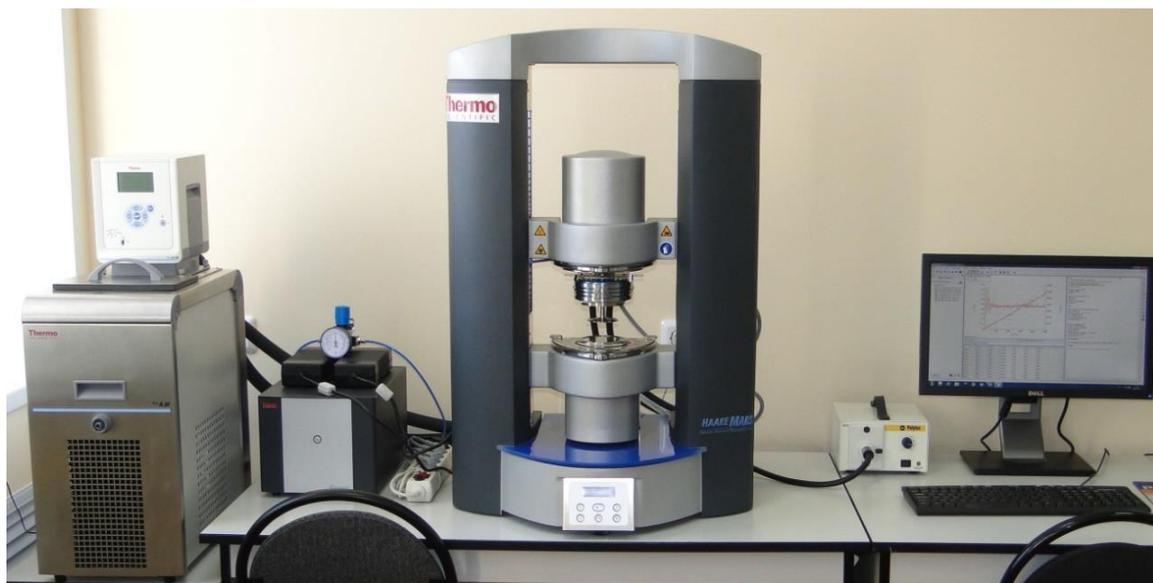


Рисунок 2.16 – Общий вид реометра *Haake MARSIII* с периферийным оборудованием

Технические характеристики: крутящий момент 10 nNm ... 0,2 Nm с разрешением 0,1 nNm; частота вращения ротора 10-8...1500 об/мин ; частота осцилляций – 10-6 .. 100Hz; измерение нормального усилия – (-50...50) Н с разрешением 0,001Н; температурное регулирование в диапазоне – -28...200°C с точностью $\pm 0,05$ °C; набор измерительных систем «конус-плоскость» и «плоскость – плоскость» различного диаметра; программное обеспечение НААКЕ RheoWin, обеспечивающее управление прибором и обработку результатов измерений.

Эта программа позволила получить для исследованных полимеров приведенные к температуре 240 °C кривые зависимости комплексной вязкости η^* от угловой скорости ротора ω . Подбор уравнений трендов

									Лист
									71
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	МД-02069964-35.04.06-60-18				

экспериментальных кривых и вычисление коэффициентов корреляции производились в программе «*Microsoft Excel*».

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

частота вращения ротора (об/мин.); вертикальное усилие на роторе (Н); время испытания (с).

После каждого цикла испытаний образцы и контртело промывались в этиловом спирте, высушивались в вакуумном шкафу *BinderVD 23* и взвешивались. Взвешивание производилось с точностью $\pm 0,1$ мг для каждого образца отдельно в трехкратной повторности на аналитических весах *CE 124-C*. Монтаж каждого образца при продолжении испытаний производился в первичной ориентации в свое гнездо прибора.

Коэффициенты сухого трения и трения со смазкой (в среде масла И-20А) определялись при варьировании параметров в следующих диапазонах: скорости скольжения 0,1 – 0,5 м/с, контактного давления 1,06 – 5,03 МПа и температуры 20 – 70°C, отвечающих параметрам эксплуатации силового гидроцилиндра С100/40×200 трактора МТЗ 80/82 [4]. При варьировании одного из параметров два других поддерживались при постоянных значениях: скорость скольжения – 0,25 м/с, контактное давление – 2,5 МПа, температура масла – 50 °С.

Статистическая обработка результатов с построением трендов производилась в программе «*Microsoft Excel*».

Средняя величина коэффициента трения за цикл испытаний рассчитывалась по следующей формуле:

$$\bar{f} = \frac{2\bar{M}}{D\bar{F}}, \quad (2.20)$$

где \bar{M} – среднее за время цикла значение крутящего момента, фиксируемое реометром, Н м; $D = 0,026$ – диаметр расположения образцов на роторе, м; \bar{F} – среднее за время цикла вертикальное усилие на роторе, Н.

Для вычисления линейной интенсивности износа (мм/мм) за цикл испытаний использована следующая формула:

$$I = \frac{\Delta\bar{h}}{S} = \frac{4\Delta V_{\Sigma}}{3\pi d^2} \frac{60}{\pi D \bar{n} t_{\text{ц}}} = 0,078 \frac{\Delta m_{\Sigma}}{\rho \bar{n} t_{\text{ц}}}, \quad (2.21)$$

где $\Delta\bar{h}$ – среднее за время цикла снижение высоты трех образцов, мм; S – путь трения, мм; ΔV_{Σ} – суммарное за время цикла снижение объема трех образцов,

										Лист
										75
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	МД-02069964-35.04.06-60-18					

мм³; Δm_{Σ} – суммарное за время цикла снижение массы трех образцов, г; ρ – плотность образца, г/мм³; $t_{\text{ц}}$ – длительность цикла испытания, с; $d = 2$ – диаметр образца, мм; \bar{n} – средняя за время цикла частота вращения ротора, об/мин.

Средняя величина контактного давления за цикл испытаний равна

$$\bar{p} = \frac{4\bar{F}}{3\pi d^2}, \quad (2.22)$$

2.7.4 Методика получения самоармированных композиций сверхвысокомолекулярного полиэтилена

Основной задачей данной методики является разработка технологического процесса получения армированных полимерных конструкционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и композиций на его основе с высокими упруго-прочностными характеристиками, низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью для изготовления антифрикционных деталей силовых гидроцилиндров общего и транспортного машиностроения, обладающих технической новизной и потенциалом коммерциализации.

В общем случае методику получения самоармированных композиций сверхвысокомолекулярного полиэтилена можно представить в виде следующей последовательности экспериментальных этапов (рис. 2.19).

- 1 Получение антифрикционного композита СВМПЭ + 0,1% УНТ методом механоактивации сухосмешанной композиции на планетарно-шаровой мельнице Fritsch Pulvirisette 7 Premium Line в течение 75 мин.
- 2 Изготовление цилиндрического образца методом прессования на прессе Gibitre GT-7014-H50C полимерной композиции при температуре 180 °С, давлении в пресс-форме 50 МПа в течение 15 мин (этап 1, рис. 2.19 а); твердофазное формование самоармированной втулки (направляющей гидроцилиндра) при температуре 130 °С, давлении в пресс-форме 50 МПа в течение 1 мин (этап 2, рис. 2.19 б); охлаждение сформованной втулки при

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

температуре 50 °С, давлении в пресс-форме 50 МПа в течение 15 мин (этап 3, рис. 2.19в).

3 Проведение упруго-прочностных испытаний в режиме сжатия на испытательной машине UAI-7000 М.

4 Статистическая обработка результатов испытаний с использованием программы «Microsoft Excel».

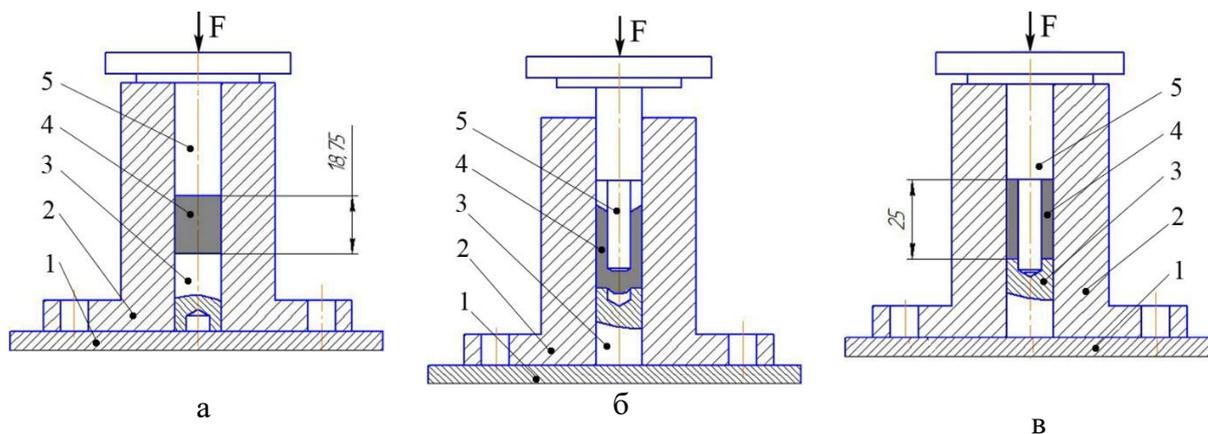


Рисунок 2.19 – Последовательность прессования втулки из композита (СВМПЭ +0,1 % УНТ) в режиме самоармирования: а –прессование заготовки (цилиндра); б – прессование втулки (промежуточная стадия); в – охлаждение сформованной втулки (заключительная стадия твердофазного формования); 1 – обогривательная плита пресса; 2 – матрица; 3 – заглушка; 4 – отпрессовка по стадиям; 5 – пуансон

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Определение оптимального времени механохимической активации смеси СВМПЭ с наноразмерными модификаторами на планетарно-шаровой мельнице «Пульверизетте-7»

Как было отмечено выше (главе 1), для изготовления полимерных деталей гидроцилиндров перспективным полимером из крупнотоннажного класса полиолефинов является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ). Для улучшения трибологических свойств в состав композиций вводят методом механохимической активации смеси СВМПЭ и тонкодисперсные и наноразмерные наполнители активного типа, такие как шунгит, наноразмерный диоксид кремния, углеродные нанотрубки и другие вещества аналогичного действия.

Обработка частиц СВМПЭ в планетарной мельнице позволяет решить одновременно несколько задач:

- увеличение эффективной поверхности изначально сферических полимерных частиц СВМПЭ в процессе их взаимодействия (сдвиговых деформаций) с мелющими телами – шарами и стенками мельницы;
- изменение молекулярного строения СВМПЭ без разрыва внутримолекулярных связей, подразумевающее изменение характера укладки углеводородных цепей;
- механическое легирование порошинок СВМПЭ наноразмерными частицами наполнителя;
- однородное перемешивание частиц СВМПЭ и наполнителя, обеспечивающее при последующем горячем прессовании однородное распределение модификатора в связующем.

С целью оценки вклада механохимической активации смеси СВМПЭ с наноразмерными модификаторами на величину упругопрочностных и реологических характеристик композитов на планетарно-шаровой мельнице

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		78

«Пульверизетте-7» и определения оптимального времени обработки проведена серия экспериментов с изменением длительности процесса в диапазоне 15 – 105мин.

В настоящей работе использован СВМПЭ марки ГУР 4120 (фирма «Тисона»),углеродные нанотрубки марки «Tuballmatrixbeta», имеющего в составе 95% НМПЭ и 5% УНТ, в концентрации 0,1%.

На рис. 3.1 представлены полученные зависимости упругопрочностных характеристик испытанных композитов от длительности механоактивации.

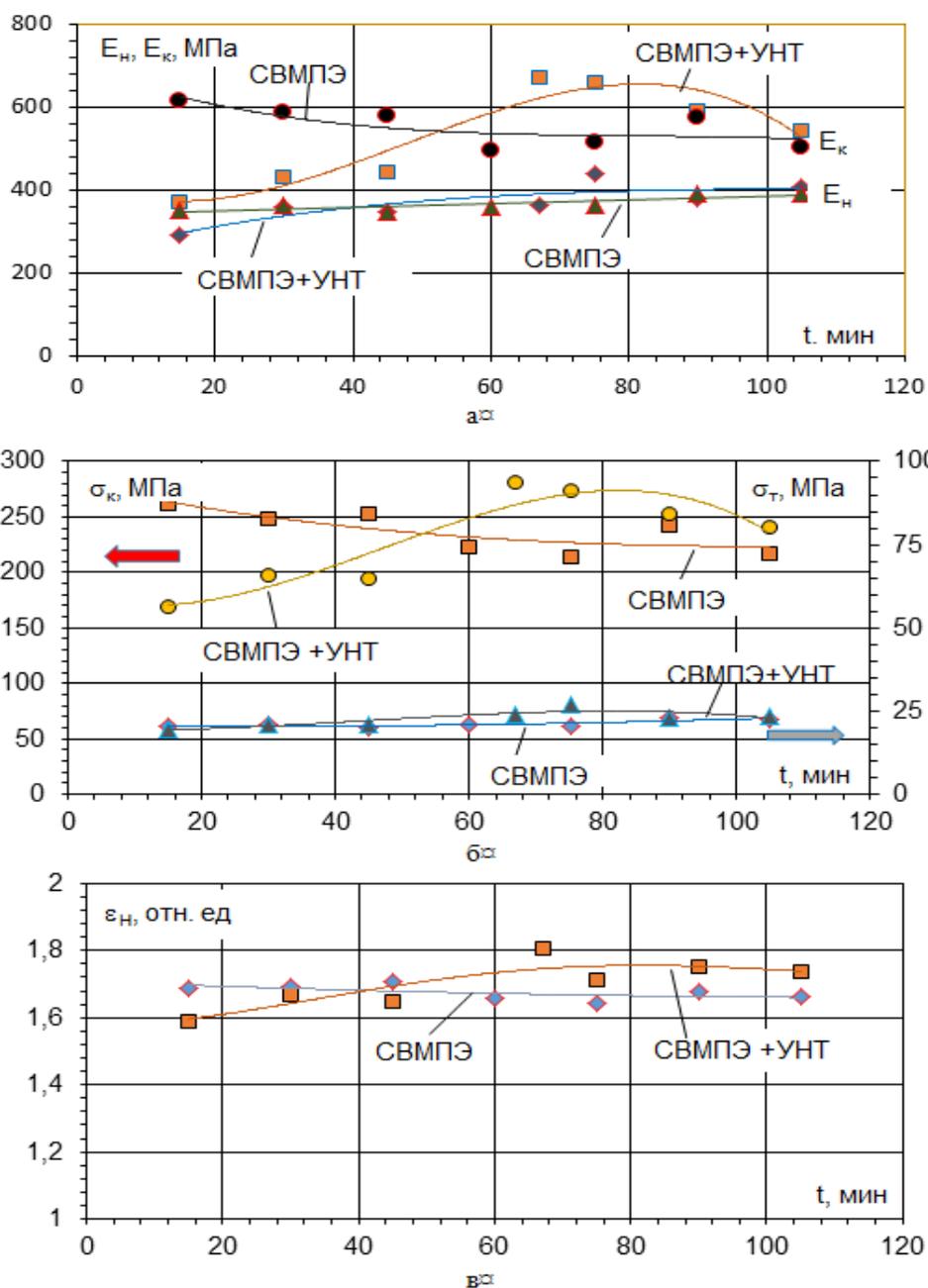


Рисунок 3.1 – Зависимость упруго-прочностных характеристик СВМПЭ и композита (СВМПЭ+0,1 % УНТ) от длительности обработки в шаровой мельнице: а – начальный (E_n) и конечный (E_k) модули упругости; б – предел текучести (σ_T) и предел прочности (σ_p); в – относительная деформация при разрыве в мере Генки

В табл.3.1 приведены сводные результаты исследований.

Таблица 3.1 – Физико-механические характеристики композиционных материалов на основе СВМПЭ

Образец	Время активации t, мин	Предел текучести σ_T , МПа	Предел прочности σ_p , МПа	Модуль упругости (начальный) E_n , МПа	Модуль упругости (конечный) E_k , МПа	Относительное удлинение по Генки, ϵ_H (отн. ед)
СВМПЭ	0	18±1	206±67	337±16	469±150	1,58±0,12
СВМПЭ	15	20,3±1,5	262,5±39,6	349,5±17,9	614,9±77,2	1,69±0,05
СВМПЭ+УНТ(0,1%)		19,3±3,5	168,9±48,7	288,5±35,5	370,1±125	1,58±0,08
СВМПЭ	30	20,7±2,1	247,8±2,9	365,3±43,1	585,2±37,0	1,69±0,01
СВМПЭ+УНТ(0,1%)		21±1	198,4±31,1	358,1±15,3	430,8±43,5	1,67±0,05
СВМПЭ	45	20,2±1,9	252,0±7,9	345,8±48,46	578,48±15,7	1,7±0,03
СВМПЭ+УНТ(0,1%)		21,3±1,2	194,9±17,6	345±7	443,6±37,9	1,65±0,04
СВМПЭ	67	21,3±1,2	223,1±7,8	358,9±21,3	493,3±23,8	1,66±0,01
СВМПЭ+УНТ(0,1%)		23,7±0,6	281,7±28,8	363,6±38,6	670,8±50,7	1,81±0,02
СВМПЭ	75	20,3±0,6	214,1±8,6	360,4±31,9	511,4±21,9	1,64±0,01
СВМПЭ+УНТ(0,1%)		27,3±4,7	274,3±42,5	441,4±70,2	657,1±110,6	1,71±0,03
СВМПЭ	90	23,2±0,8	242,3±5,8	388,6±16,4	575,6±59,4	1,68±0,03
СВМПЭ+УНТ(0,1%)		23	252,2±16,3	377,8±16,9	591,5±48,7	1,75±0,03
СВМПЭ	105	22,5±2,3	217,2±14,3	390,9±33,8	503,6±57,4	1,66±0,02
СВМПЭ+УНТ(0,1%)		23,3±1,5	241,7±21,5	407,1±28,0	543,3±77,1	1,74±0,04

Как следует из представленных результатов механохимическая активация сухосмешенных композиций приводит к увеличению всего комплекса предела текучести (σ), начального модуля упругости (E) и предела прочности. При этом при малых значениях времени активации(15 – 45 мин) упругопрочностные характеристики СВМПЭ превосходят характеристики СВМПЭ + 0,1% УНТ, что можно объяснить неудовлетворительным качеством диспергирования УНТ в

объеме СВМПЭ. В данном случае агломераты УНТ выполняют роль концентраторов напряжений в испытуемом образце.

Из результатов следует, что оптимальное время активации составляет 67-75 минут. При дальнейшем увеличении времени активации имеет место заметное снижение указанных характеристик, что вероятно связано с деструкцией макромолекулярных цепей СВМПЭ.

Исключая вклад механохимической активации, можно сделать вывод о значительном влиянии сверхмалого содержания УНТ (0,1 %) на прирост упругопрочностных характеристик. Согласно табл. 3.1 значения приростов составили: предела текучести – 35 %, предела прочности – 28 %, начального модуля упругости – 23%, конечного модуля упругости – 29 %.

На рис. 3.2 представлена типичная кривая растяжения образцов СВМПЭ и композиции СВМПЭ + 0,1 % УНТ и схемы определения пределов прочности σ_p и текучести σ_t .

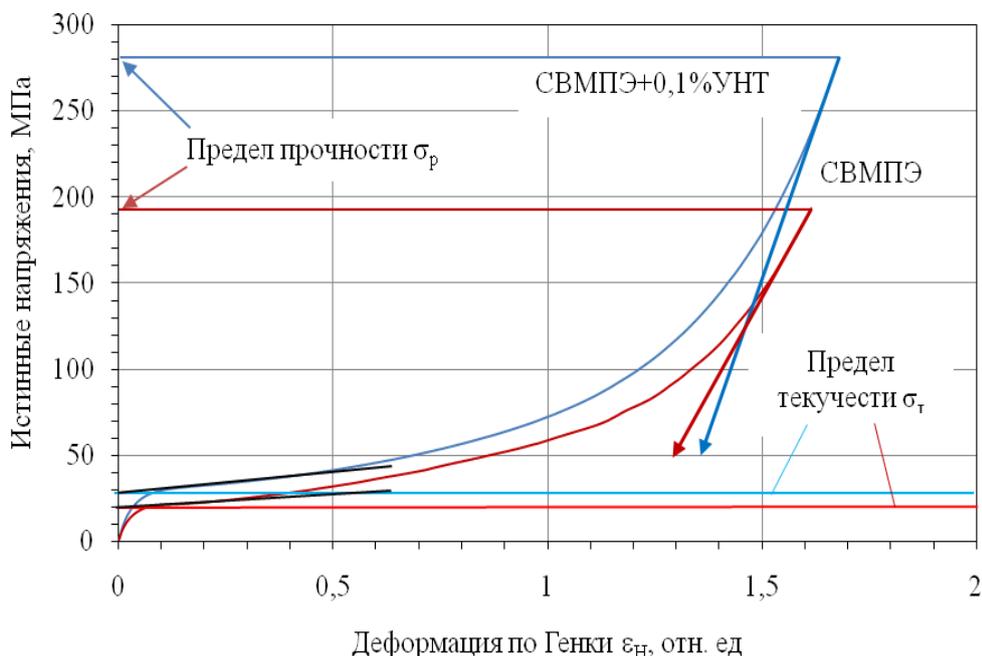


Рисунок 3.2 – Типичная кривая растяжения образцов СВМПЭ и композиции СВМПЭ + 0,1 % УНТ и схемы определения пределов прочности σ_p и текучести σ_t

Как следует из схемы начальный и конечный модули упругости представляют собой тангенсы углов наклона линейных частей кривых в начале и конце нагружения. Относительная деформация в мере Генки вычислялась по формуле

$$\varepsilon_H = \text{Ln} \frac{l(t)}{l_0}, \quad (3.1)$$

где $l(t)$ – текущая длина образца, мм; $l_0 = 50$ – начальная длина рабочей части образца, мм.

На рис. 3.3 а представлен внешний вид исходного порошка СВМПЭ, на рис. 3.3 б – внешний вид порошка СВМПЭ + 0,1% УНТ после обработки в течении 75 мин в планетарно-шаровой мельнице, на рис. 3.4а – образец отпрессованной пластины толщиной 0,6 мм из указанного состава без обработки в мельнице, на рис. 3.4 б – образец отпрессованной пластины толщиной 0,6 мм из указанного состава с обработкой в мельнице в течение 75 мин.



а



б

Рисунок 3.3– Исходный порошок СВМПЭ (а) и композиция после деформационной обработки СВМПЭ, модифицированный нанотрубками (б)



а



б

Рисунок 3.4 - Образец антифрикционного композита без механохимической активации на основе СВМПЭ+ УНТ(0,1%), полученный методом горячего прессования (а) и образец антифрикционного композита на основе СВМПЭ+УНТ(0,1%) после механохимической активации сухосмешанной композиции на планетарно-шаровой мельнице с последующим

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		82

твердофазным формованием композиции на прессе (б)

Из представленных микрофотографий следует, что в процессе механохимического воздействия происходит многократное деформирование частиц СВМПЭ, приводящее к раскатыванию почти сферических частиц СВМПЭ до плоских чешуек с размерами 50-200 мкм. Механохимическая активация полимерного порошка СВМПЭ + 0,1%УНТ приводит к

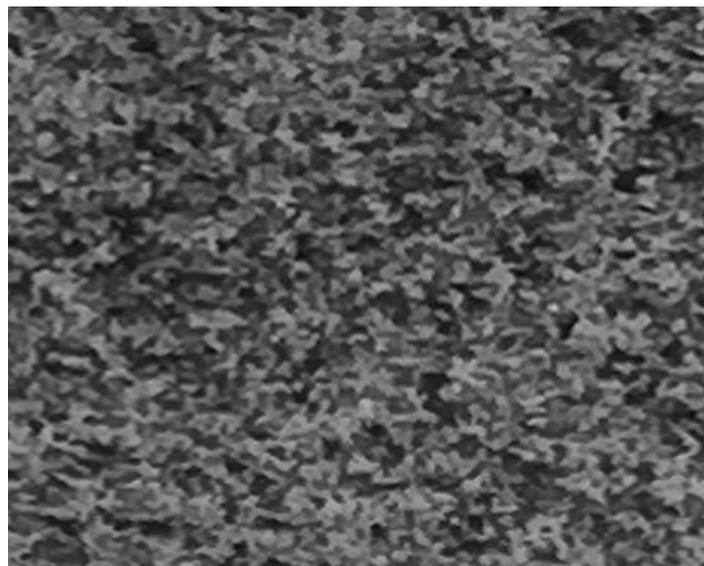


Рис. 3.5 – Внешний вид пленки из механоактивированной смеси СВМПЭ + УНТ (0,1 %); фрагмент 2 увеличение 187 кр.

изменению формы частиц, увеличению эффективной поверхности частиц связующего и встраиванию нанотрубок в структуру полимера (рис. 3.5). Суммарным результатом протекающих процессов является рост упругопрочностных характеристик.

3.2 Исследование физико-механических характеристик композитов «СВМПЭ +SiO₂» и «СВМПЭ +Al₂O₃»

На первом этапе исследований были проведены сравнительные испытания образцов антифрикционных материалов: полиамида (ПА 6), СВМПЭ и коммерческого композита УПА6-15А. Испытания проводились согласно методике, изложенной в разделе 2.6.1.

На рис. 3.6 представлены типичные кривые растяжения в координатах «напряжение-деформация», а в табл. 3.2 – средние значения и стандартные отклонения физико-механических характеристик испытанных образцов полимерных материалов.

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		83

Угленаполненный полиамид УПА6-15А при более, чем в 10 раз меньшем значении прочности, имеет в 4,8 раза большее значение модуля упругости, достигаемое его наполнением высокомодульным углеволокном.

Таблица 3.2 – Физико – механические характеристики полимеров

Вид полимера	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Модуль упругости (конечный), МПа	Модуль упругости (начальный), МПа
ПА 6	40 ± 4	182 ± 6	300± 25	1600 ± 300
СВМПЭ	20 ± 2	258 ± 25	680 ± 50	305 ± 20
УПА 6 15А	66 ± 7	66,5±4,65	3290 ± 400	

Целью второго этапа исследований являлось определение влияния тонкодисперсных наполнителей на физико-механические характеристики композитов на основе СВМПЭ марки ГУР 4120 (фирма «Ticona»).

В исследовании использованы гидрофобный нанокристаллический диоксид кремния SiO₂ дисперсностью 20 мкм в концентрациях от 0,05% до 0,2% и нановолокна оксида алюминия марки «Nafen» дисперсностью 10...20 мкм в концентрации 0,1%.

Исследуемые композиты (в виде сухосмешенного порошка) предварительно подвергали механохимической активации на планетарно-шаровой мельнице «Пульверизетте-7» согласно методике, изложенной в разделе 2.5.

Для проведения физико-механических испытаний на лабораторной гидравлическом прессе Gibitre формовались пленки, из которых для испытаний на растяжение (ГОСТ 11262-80) вырубали штанцем стандартные образцы(двухсторонние лопатки с шириной рабочей части 6 мм, длиной – 50 мм) в количестве 5 шт для каждого состава.

В табл. 3.3 представлены полученные результаты. Здесь же для сравнения приведены описанные в табл. 3.1 результаты для композиции СВМПЭ + 0,1% УНТ с такой же длительностью обработки в шаровой мельнице.

Таблица 3.3 – Физико-механические характеристики композиционных материалов на основе СВМПЭ

Образец	Предел текучести σ , МПа	Предел прочности σ_p , МПа	Модуль упругости (начальный) E_n , МПа	Модуль упругости (конечный) E_k , МПа	Относительное удлинение по Генки ϵ_n , (отн. ед)
СВМПЭ	20,3±0,6	214,1±8,6	360,4±31,9	511,4±21,9	1,64±0,01
СВМПЭ+УНТ(0,1%)	27,3±4,7	274,3±42,5	441,4±70,2	657,1±110,6	1,71±0,03
СВМПЭ+Al ₂ O ₃ (0,1%)	22,5±0,5	261,3±12,6	365,6±37,3	656,5±45,6	1,71±0,01
СВМПЭ+SiO ₂ (0,05%)	20,7±0,6	277,9±15,3	364,5±39,1	674,3±33,2	1,7±0,02
СВМПЭ+SiO ₂ (0,1%)	21,7±1,5	308,1±2,5	345,1±19,2	704,0±45,0	1,76±0,01
СВМПЭ+SiO ₂ (0,15%)	21±1	296,1±18,3	358,0±37,3	747,3±57,7	1,73±0,03
СВМПЭ+SiO ₂ (0,2%)	21,5±0,5	237,4±11,9	362,8±29,4	601,2±23,9	1,66±0,02

Из представленных результатов следует, что наибольшее влияние на указанные характеристики оказывает тонкодисперсный диоксид кремния. Ввод данного модификатора в оптимальной концентрации (0,1 %) способствует повышению предела текучести на 7 %, предела прочности на 44 %, конечного модуля упругости на 38 %. В случае начального модуля упругости происходит снижение показателя на 4 %.

Следует отметить, что лучший результат по всему комплексу упругопрочностных характеристик достигается в случае модификации СВМПЭ углеродными нанотрубками. Ввод УНТ в оптимальной концентрации (0,1 %) обеспечивает повышение предела текучести на 35 %, предела прочности на 28 %, начального модуля упругости на 23 % и конечного модуля на 29 %.

3.3 Исследование упругопрочностных характеристик самоармированных композитов СВМПЭ

Изготовление самоармированных композитов СВМПЭ производили в соответствии с методикой описанной в разделе 2.6.4.

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		86

Исследование упругопрочностных характеристик указанных композитов проводили в условиях сжатия на испытательной машине UAI-7000 при скорости нагружения 0,5 мм/мин. Образцы из СВМПЭ без механохимической активации сжимали до достижения нагрузки 70 Н, образцы из композита СВМПЭ + 0,1% УНТ – до достижения нагрузки 250 Н.

Были испытаны образцы в форме цилиндра и втулки (рис. 3.7).

Как описано в разделе 2.6.4, цилиндрические образцы формовали при температуре 180 °С в условиях объемного сжатия. Втулки получали путем переформовки цилиндрических образцов при $T = 130$ °С, т.е в режиме твердофазного прессования. В процессе заполнения формующей полости происходила продольная вытяжка формуемого массива с достижением эффекта самоармирования.

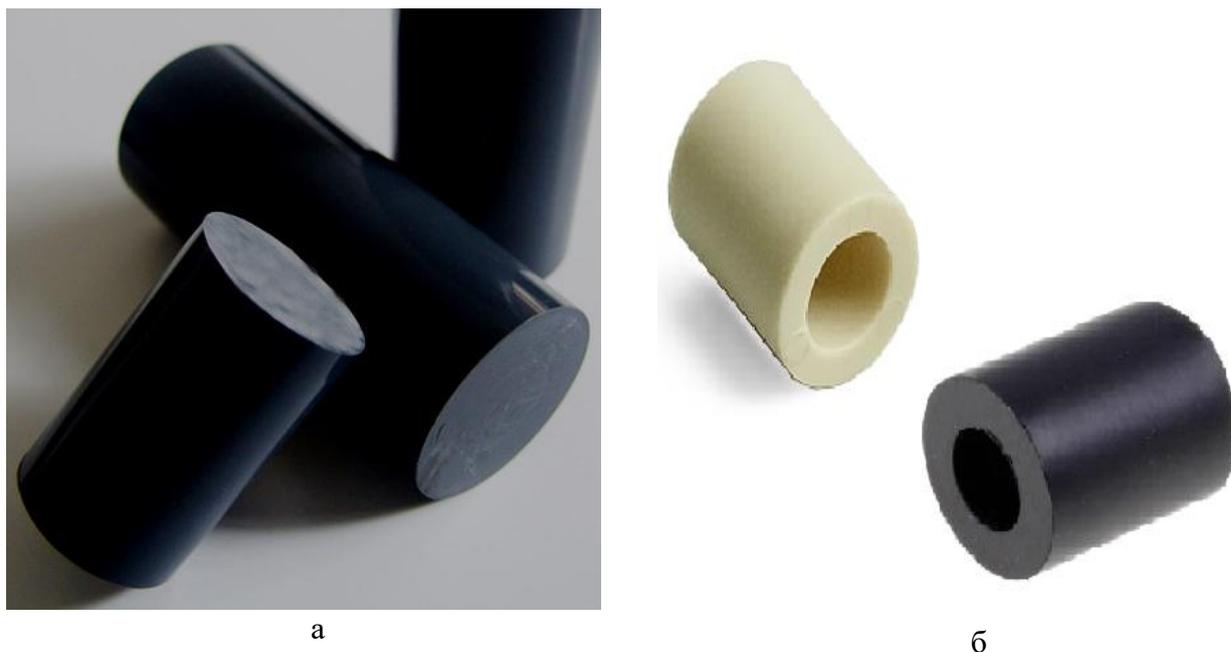


Рисунок 3.7 – Внешний вид цилиндрических образцов (а) и самоармированных втулок (б)

На рис. 3.8 представлены полученные графики нагружения: цилиндрических образцов (рис.3.8 а) и втулок (рис. 3.8 б).

При обработке графиков значения предела текучести, модуля упругости при сжатии и относительной деформации при сжатии вычислены по ГОСТ 9550-81.

Таблица 3.4 – Упругопрочностные характеристики цилиндрических образцов

Образец	Модуль упругости E_n , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение ϵ , (отн. ед)
СВМПЭ (без м/а)	175	1,5	0,009
СВМПЭ (м/а 75 мин)	290	7,8	0,068
СВМПЭ+УНТ(0,1%)(м/а 75мин)	330	7,8	0,055

Таблица 3.5 – Упругопрочностные характеристики самоармированных втулок

Образец	Модуль упругости E_n , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение ϵ , (отн. ед)
СВМПЭ (без м/а)	190	1,8	0,01
СВМПЭ (м/а 75мин)	312	4	0,04
СВМПЭ+УНТ(0,1%)(м/а 75мин)	370	6,4	0,057

Как следует из таблиц значения упругопрочностных характеристик для самоармированных образцов (втулок) заметно выше, чем у цилиндрических образцов, полученных без наложения самоармирования. Прирост модуля упругости составил: для образцов из СВМПЭ (без м/а) –9 %; для образцов из СВМПЭ (м/а) – 8 %; для образцов СВМПЭ + 0,1% УНТ (м/а) – 12 %.

Относительно небольшие значения прироста модуля упругости самоармированных образцов объясняются тем, что на этапе переформовки цилиндра во втулку значения продольных деформаций, обуславливающих макромолекулярную ориентацию, в пресс-форме не превышали 15...20 %. Несмотря на это, следует отметить перспективность разработанной технологии получения самоармированных втулок применительно к производству направляющих для гидроцилиндров из указанного композита. Очевидно, что при разработке техпроцесса самоармирования конструкция пресс-формы должна обеспечивать достижение продольных деформаций не ниже 80 ... 100 %.

3.4 Исследование реологических характеристик композитов «СВМПЭ» и «СВМПЭ + УНТ»

Для сравнительной оценки технологичности полученных композитов проведены реологические исследования при температурах 150, 160, 170, 180°C. Реологические испытания расплавов композитов в динамическом режиме на реометре *Haake MARSIII* проведены согласно методике, изложенной в разделе 2.4.3.

На рис. 3.9 представлена зависимость динамической вязкости композиции от скорости сдвига (угловой скорости осцилляций ротора) для сухосмешенных композиций с различной длительностью механохимической активации в планетарно – шаровой мельнице. На поле графика представлены тренды экспериментальных значений. Как следует из графиков, указанные зависимости для всех композиций описываются с высоким коэффициентом корреляции реологическим уравнением Оствальда.

На рис. 3.10 представлены зависимости коэффициентов консистенции k_i индекса течения n от длительности механоактивации для СВМПЭ (а) и композиции СВМПЭ + 0,1 % УНТ (б).

Анализируя полученные результаты можно сделать следующее заключение:

- в целом с ростом длительности обработки имеет место заметный рост вязкости расплавов композитов;

- для СВМПЭ наблюдаются экстремумы реологических констант для длительности обработки 60...70 мин, причем коэффициент консистенции принимает максимальное значение (40000 Па·сⁿ), а индекс течения – минимальное (0,158);

- для композиции СВМПЭ + 0,1% УНТ для длительности обработки 60...70 мин наоборот наблюдается максимум индекса течения (0,26), при этом коэффициент консистенции после выхода на постоянное значение (100000...120000 Па·сⁿ) возрастает до 380000 Па·сⁿ при длительности обработки 105 мин.

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		90

- результаты реологических испытаний подтверждают сделанное по результатам физико-механических испытаний заключение о том, что оптимальное время механохимической активации должно составлять 68...75 мин

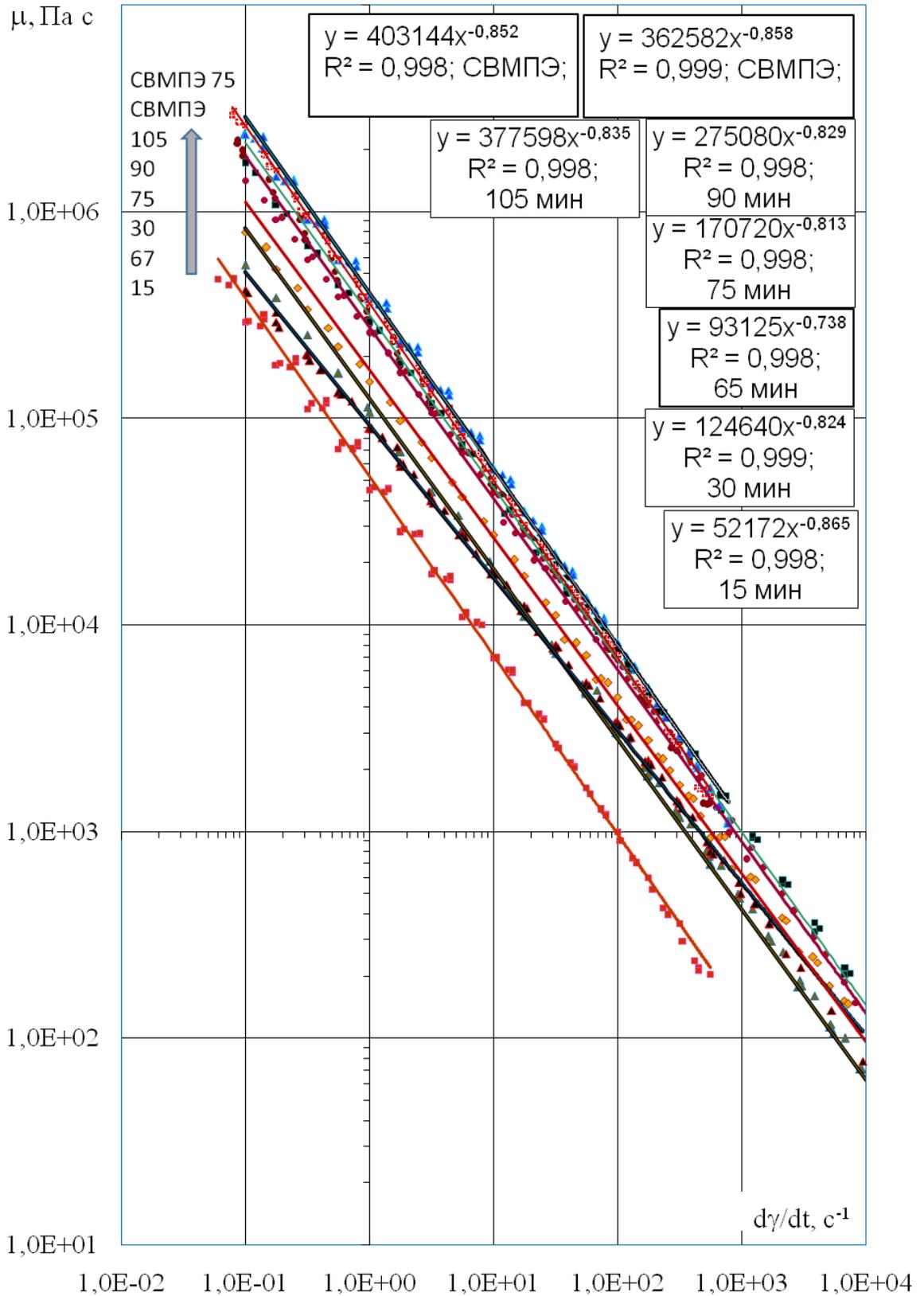
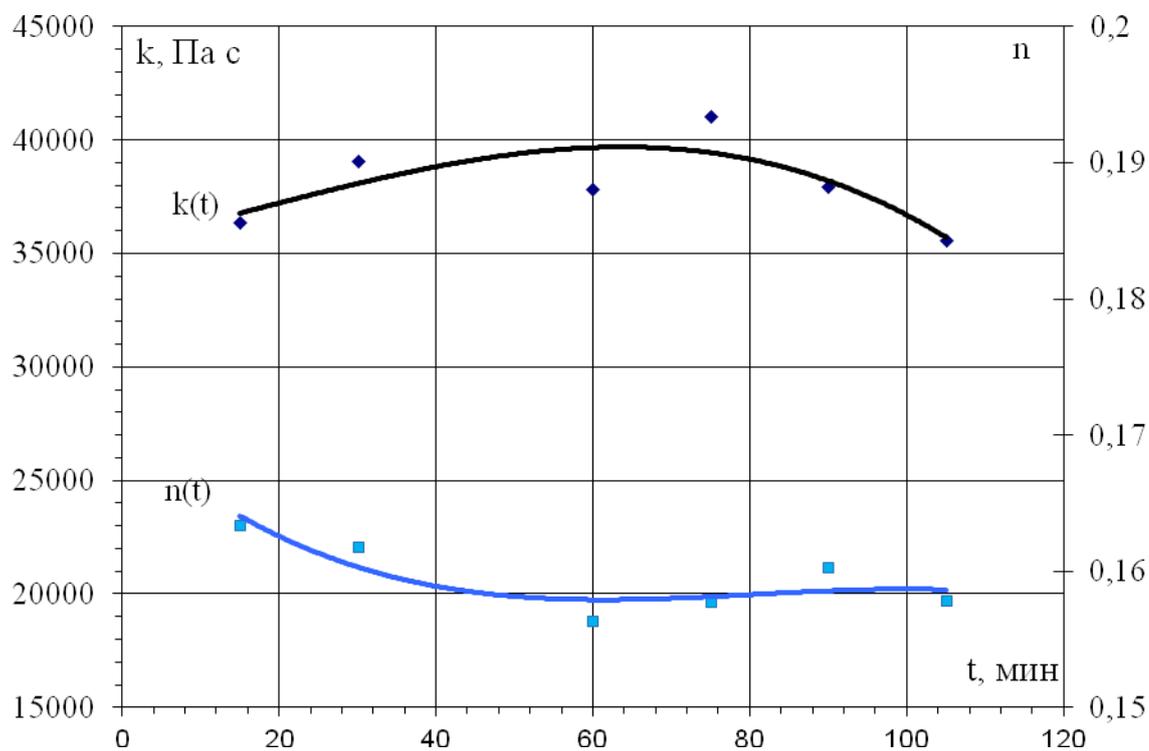
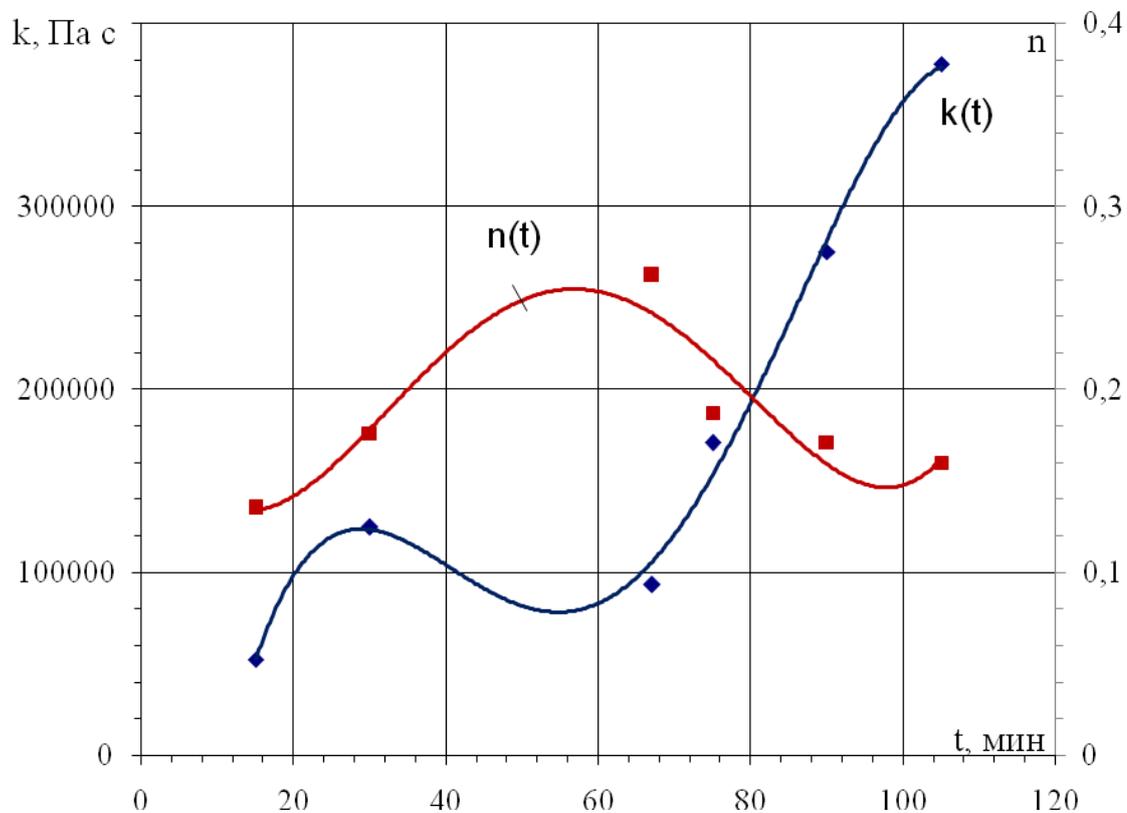


Рисунок 3.9 – Зависимость вязкости СВМПЭ и композиций СВМПЭ +0,1 % УНТ от времени их обработки в планетарно-шаровой мельнице для температуры расплава 180 °С



а



б

Рисунок 3.10 – Зависимость параметров реологической модели Оствальда от времени обработки СВМПЭ (а) и композиций СВМПЭ + 0,1 % УНТ в планетарно-

3.5 Исследование трибологических характеристик композитов «СВМПЭ + УНТ»

На первом этапе проведены сравнительные триботехнические испытания на триботехнической приставке лабораторному смесителю периодического действия *PolyLabRheomix 600 OS* образцов СВМПЭ, полиамида (ПА 6) и коммерческого угленаполненного полиамида УПА6-15 по методике раздела 2.4.

На рис. 3.11 представлены полученные графики зависимости коэффициентов трения для образцов ПА 6, УПА6-15А и СВМПЭ от скорости скольжения. В табл. 3.6 приведены полученные значения коэффициентов трения покоя ($f_{п}$) и при скорости скольжения 0,5 м/с ($f_{0,5}$) для условий сухого и жидкостного трения.

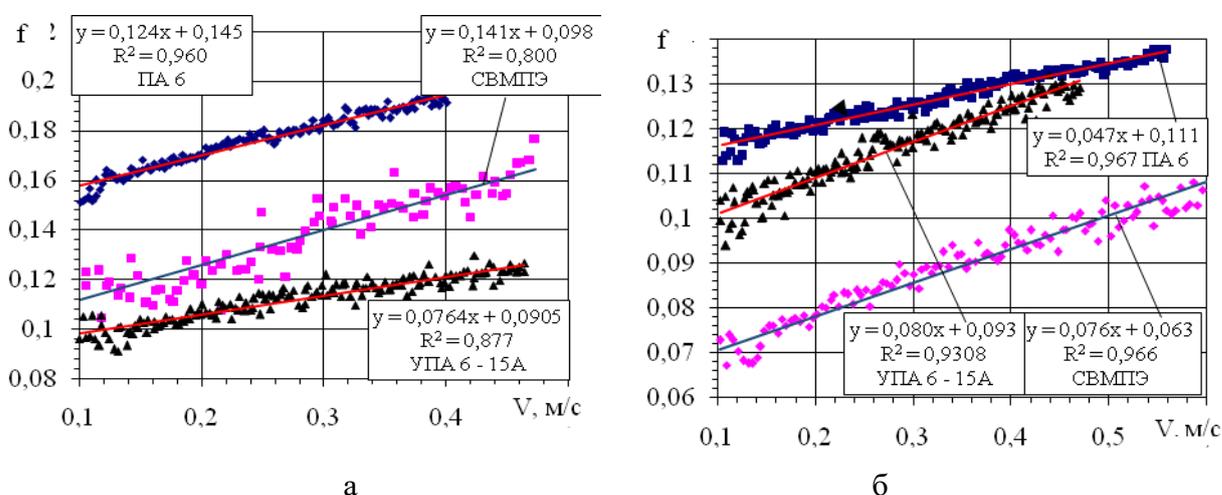


Рисунок 3.11 – Зависимость коэффициентов трения исследованных образцов антифрикционных полимерных материалов для условий сухого (а) и жидкостного (б) трения от скорости скольжения

Таблица 3.6 – Значения коэффициентов трения образцов полимеров

Вид полимера	Условия сухого трения		Условия жидкостного трения	
	$f_{п}$	$f_{0,5}$	$f_{п}$	$f_{0,5}$
ПА 6	0,146	0,207	0,111	0,135
УПА 6 -15А	0,091	0,129	0,093	0,133
СВМПЭ	0,091	0,166	0,063	0,101

Как следует из результатов значения коэффициентов трения композита СВМПЭ + 0,1% УНТ (м/а 75 мин) значительно ниже, чем у композита СВМПЭ + 0,1% УНТ (м/а 45 мин) во всех вариантах эксперимента и заметно ниже, чем у чистого СВМПЭ. Необходимо отметить также различное влияние варьируемых параметров на данную трибологическую характеристику.

При увеличении скорости скольжения коэффициент трения у всех образцов возрастает. Меньшие значения коэффициента трения имеют место у СВМПЭ и композита СВМПЭ + 0,1% УНТ (м/а 75 мин).

При увеличении контактного давления коэффициент трения у образцов СВМПЭ + 0,1% УНТ (м/а 45 мин) снижается, у образцов СВМПЭ и СВМПЭ + 0,1% УНТ (м/а 75 мин) проходит через экстремум. Меньшие значения коэффициента трения достигаются у композита СВМПЭ + 0,1% УНТ (м/а 75 мин).

При увеличении температуры коэффициент трения у всех композитов снижается. Меньшие значения коэффициента трения достигаются композита СВМПЭ + 0,1% УНТ (м/а 75 мин).

При выборе диапазона варьирования указанных параметров исходили из необходимости приближения их к значениям силовых и кинематических параметров силового гидроцилиндра С100/40×200 трактора МТЗ 80/82 (скорость V движения поршня – 0,15 м/с, контактное давление p_v в паре «шток-крышка гидроцилиндра» – 2,5 МПа) в среде индустриального масла И-20А (раздел 2.1).

Испытания на износостойкость были проведены для композита СВМПЭ + 0,1% УНТ (м/а 75 мин) и чистого СВМПЭ при температуре $T = 25^\circ\text{C}$, скорости скольжения 0,15 м/с, контактном давлении – 2,5 МПа.

Полученные результаты представлены в табл.3.8.

Таблица 3.8 – Значения коэффициента трения и износа в среде индустриального масла И-20А

Образец	Значения линейной интенсивности изнашивания (в среде И-20А)	Коэффициент трения изнашивания (в среде И-20А)
---------	---	--

СВМПЭ (без м/а)	$2,46 \cdot 10^{-8}$	0,053
СВМПЭ+УНТ(0,1%) (м/а 75мин)	$1,85 \cdot 10^{-8}$	0,0496
УПА6-15А	$2,73 \cdot 10^{-8}$	0,133

Как следует из результатов, при данных параметрах испытания трибологические характеристики композита СВМПЭ + 0,1% УНТ (м/а 75 мин) существенно лучше, чем у чистого СВМПЭ.

Можно заключить, что введение углеродных нанотрубок способствует существенному улучшению трибологических характеристик СВМПЭ .

Таким образом, проведенные исследования позволяют заключить, что композит СВМПЭ+УНТ(0,1%) является превосходным материалом для изготовления антифрикционных деталей сельхозмашиностроения, поскольку он отличается от исходного СВМПЭ более низкими значениями коэффициента трения и линейной интенсивности изнашивания в среде индустриального масла при условиях, приближенных к эксплуатационным. Кроме того, данный полимер проявляет более стабильное триботехническое поведение при изменениях скоростей скольжения, контактных давлений и температур пар трения.

В результате проделанной работы установлена возможность существенного улучшения упруго-прочностных, технологических и трибологических характеристик СВМПЭ за счет ввода в него малой концентрации (0,1 %) углеродных нанотрубок марки «Tuballmatrixbeta». Низкое наполнение оставляет возможность введения целевых добавок – модификаторов для дальнейшего улучшения упруго-прочностных и трибологических характеристик материала при сохранении его низкой себестоимости. Это дает основания считать перспективным использование данных композитов для изготовления антифрикционных деталей сельскохозяйственной техники.

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		96

4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РАЗРАБОТАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА И ТЕХНОЛОГИЙ ЕГО ПРОИЗВОДСТВА

Как уже было отмечено в разделе 1.1.1 конструкция современного гидроцилиндра содержит свыше 20 наименований полимерных деталей (рис. 4.1).

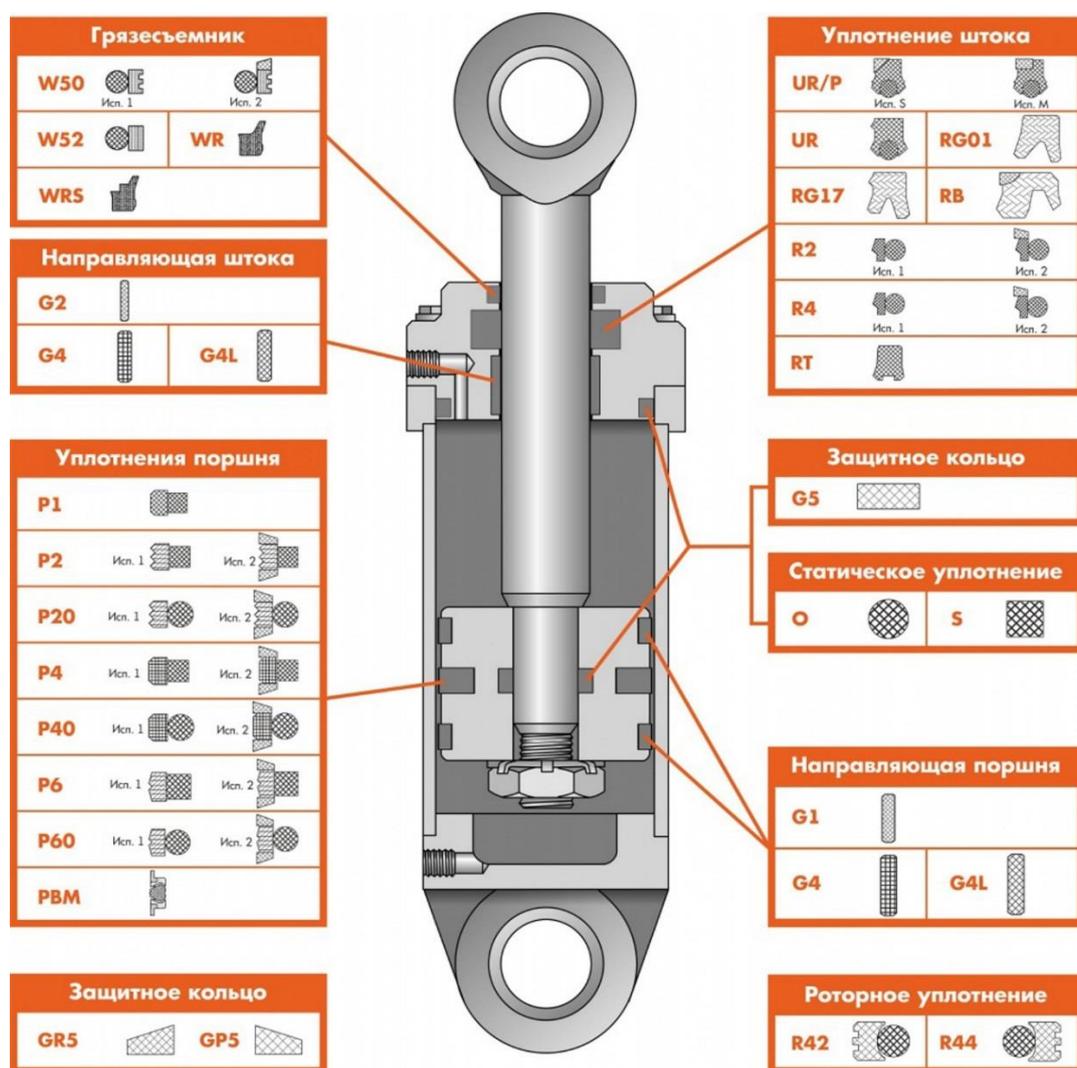
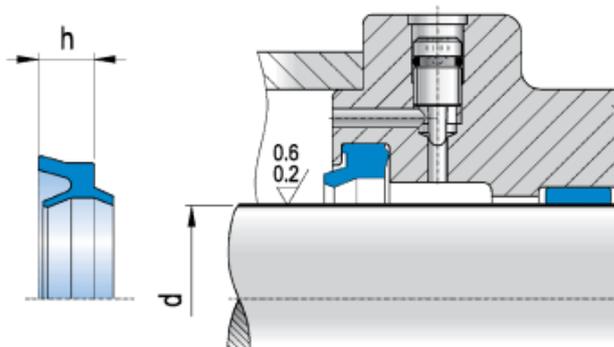


Рисунок 4.1 – Антифрикционные полимерные детали силового гидроцилиндра

Разработанный в настоящем исследовании антифрикционный композиционный материал может быть эффективно использован для изготовления элементов комбинированных уплотнителей, грязезащитных и антиэкструзионных колец, опорно-направляющих колец и других деталей.

Грязесъемники (рис. 4.2) устанавливаются в гидравлические цилиндры с целью удаления грязи, различных частиц, влаги и др. со штока во время движения в системе, таким образом, предохраняя гидравлическую среду от загрязнения, а уплотнения и другие компоненты от повреждения.

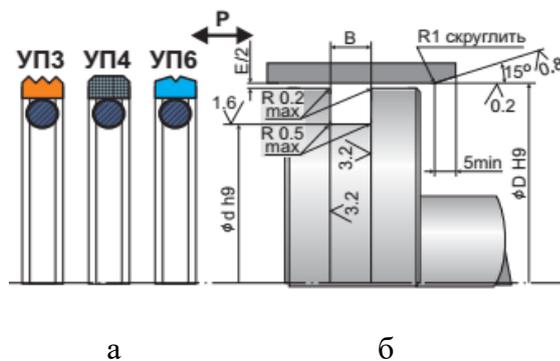
Грязесъемники могут применяться как однонаправленного, так и двунаправленного действия в зависимости от их применения и системы уплотнения. Их функции четко разграничиваются: грязесъемник однонаправленного действия разработан для предохранения от внешних



а б
Рисунок 4.2 – Внешний вид грязесъемного кольца (а) и схема его монтажа (б)

загрязнений, у грязесъемника двунаправленного действия есть дополнительная функция оптимизировать систему уплотнения и удалять остаточный слой жидкости для избежания внешних утечек.

Комбинированное уплотнение поршня (рис. 4.3) предназначено для уплотнения поршней или штоков гидроцилиндров. Уплотнение устанавливается между поршнем и корпусом цилиндра, штоком и крышкой гидроцилиндра и содержит два кольца. Кольцо прямоугольного (фасонного)



а б
Рисунок 4.3 – Типы комбинированных уплотнений поршня (а) и схема их монтажа (б)

сечения выполняет функцию трибосопряжения, взаимодействуя с гильзой цилиндра или штоком, и выполняется из антифрикционного термопласта, например, полиамида или фторопласта. Предлагается изготавливать его из разработанного композита (СВМПЭ + 0,1% УНТ). Другое кольцо круглого сечения, посаженное на поверхность поршня или крышки гидроцилиндра, изготавливается из резины (эластомера) и выполняет силовую функцию,

попадания на поверхность штока пыли и абразивов во время обратного хода, в расточке передней крышки установлен грязесъёмник 11, который закреплен при помощи пластины 12. Поршень разделяет цилиндр на две изолированные полости-переднюю и заднюю. Масло от распределителя подводится к каждой полости отдельно. Для подвода и отвода рабочей жидкости к задней полости гидроцилиндра передняя 1 и задняя 6 крышки соединены маслопроводом 8. В расточку передней крышки установлен гидромеханический клапан ограничения хода 9. Направляющая клапана 10 установлена в расточке передней крышки и закреплена при помощи пластины 12.

Существует ошибочное мнение, что гидроцилиндры являются самыми надежными агрегатами гидросистемы. Опыт эксплуатации гидрофицированных машин показал, что на долю гидроцилиндров приходится 17...30 % отказов всей гидросистемы [51].

Гидроцилиндры во время эксплуатации подвержены совместному действию внезапных и постепенных отказов. К внезапным отказам относятся отказы гидроцилиндров, возникшие в связи с образованием дефектов на рабочих поверхностях деталей, сопряженных с уплотнителем. К постепенным относятся отказы, связанные с изнашиванием рабочих поверхностей деталей. Относительная доля постепенных отказов составляет примерно 20 % от общего числа отказов [50].

В начальном периоде работы гидроцилиндра преобладают постепенные отказы, а затем, по мере увеличения наработки, увеличивается число случайных отказов. Влияние на гидропривод тяжелых режимов работы, агрессивных сред, знакопеременных нагрузок ведет к более интенсивному износу деталей гидроцилиндров и снижению их долговечности [63]. Все эти факторы способствуют увеличению износа уплотнительных узлов и направляющих элементов гидроцилиндра.

В настоящее время можно выделить несколько способов восстановления работоспособности гидроцилиндров. Все они имеют свои преимущества и

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		101

недостатки. В главе 1 диссертации было показано, что ресурсопределяющими для гидроцилиндров являются штоковый и поршневой уплотнительные узлы.

Восстановление изношенных штоков и гильз. В Интернет – источниках представлен способ ремонта гидроцилиндров заменой изношенных штоков и гильз на новые хромированные штоки и гильзы из хонингованных труб необходимого диаметра и длины [53]. Штоки и трубы для ремонта гидроцилиндров изготавливаются из материалов Ст35, Ст45, Ст40Х. Поверхность штока обработана хромом твердым на глубину 20 мкм. Штоки также могут поставляться с закалкой на глубину до 2 мм. А для штоков при коммерческой длине 600...1700 мм проводится закалка ТВЧ.

Ремонт данным способом обеспечивает межремонтный ресурс гидроцилиндров на 80 % доремонтного ресурса. Данный способ рационально применять к гидроцилиндрам с дефектами, которые либо восстановить невозможно, либо это делать нерентабельно: разрыв штока; деформация гильзы; погнутость штока с деформацией, не устраняемая правкой; коррозия, риски и следы схватывания, занимающие более 50 % площади рабочей поверхности.

Расчет себестоимости ремонта гидроцилиндров марки С100/40×400 и С75/30×400 с учетом расходов на комплектующие показывает, что себестоимость ремонта гидроцилиндров с заменой деталей на новые составляет около 80 % от стоимости нового гидроцилиндра [57]

Технология восстановления штока при ремонте очень часто копирует технологию изготовления, отличаясь лишь введением операций по увеличению диаметра и финишными технологическими операциями.

Существует технология восстановления, заключающаяся в наплавке проточенного штока в среде углекислого газа порошковыми проволоками с последующими шлифованием и хромированием [53]. Твердость покрытия составляет 50...58 ед. Штоки восстанавливаются на увеличенный диаметр, при этом отверстия передних крышек растачивают и не восстанавливают. Данная технология имеет ряд недостатков: высока стоимость наплавочного

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		102

оборудования и используемых материалов; не исключено применение гальванических операций; при изменении размеров сопряженных деталей нарушается степень сжатия резиновых колец, что приводит к их ускоренному износу при эксплуатации.

Описанные в работе [54] методы восстановления автоматической наплавкой под слоем флюса и плазменным напылением имеют ряд достоинств: надежная защита наплавленного слоя от окисления; возможность автоматизации процесса наплавки. Однако дефицитные расходные материалы, низкое качество и низкая износостойкость наплавленного слоя, значительный нагрев восстанавливаемых деталей до температуры 350–370°C, и, как следствие, понижение усталостной прочности детали на 20–40 % являются недостатками данных методов, что не позволяет их применять в технологии ремонта гидроцилиндров.

Более прогрессивным методом восстановления является метод электроискровой обработки (ЭИО), который был разработан с целью упрочнения и легирования деталей, режущего инструмента, штампов [55;54]. Впервые метод ЭИО для восстановления деталей агрегатов применил профессор Ф. Х. Бурумкулов со своими учениками, научные труды которых в виде реальных проектов успешно реализованы и в настоящее время используются на некоторых ремонтных предприятиях России и стран СНГ. Электроискровая наплавка позволяет: проводить локальную обработку поверхности детали; отказаться от использования флюсов или защитных газов; обеспечить высокую прочность сцепления покрытия с основой с образованием металлической связи; отказаться от предварительной подготовки и обработки восстанавливаемой поверхности к наплавке; обеспечить экологическую чистоту окружающей среды; использовать малогабаритное, транспортабельное оборудование; использовать для питания установок бытовую осветительную сеть [57].

К недостаткам данного метода восстановления деталей следует отнести весьма высокую трудоемкость [58].

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		103

В Интернет-источнике [59] описан способ восстановления гильз цилиндров методом нанесения полимерного покрытия, который заключается в заполнении жидкой полимерной композицией, с последующим ее отверждением, щелевого зазора между покрываемой поверхностью и поверхностью формующего элемента. После отверждения пластмассы следует механическая обработка цилиндра, которая проводится для снятия фасок. Применение рассмотренного способа обеспечивает высокую точность и чистоту внутренних поверхностей металлопластмассовых цилиндров, высокую производительность и экономичность ремонта. Однако при восстановлении гильз данным способом полимерная композиция не обеспечит требуемой стойкости к образованию рисок и задиров. Формующий элемент необходимо изготавливать индивидуально для каждого диаметра гильзы. К тому же при реализации данной технологии для получения равномерной толщины покрытия необходима специальная оснастка для обеспечения соосности формующего элемента и гильзы цилиндра

По результатам настоящей работы для оперативного восстановления работоспособности поршневого узла и передней крышки гидроцилиндра предлагается изменение их конструкции с монтажом в крышку и поршень гидроцилиндров направляющих опорно-направляющих колец (рис. 4.2) из износостойких полимерных композитов, разработанных в настоящей работе, что приведет к значительному снижению интенсивности изнашивания деталей ресурсопределяющих сопряжений и снижению трудоемкости ремонта гидроцилиндров.

На рис. 4.3 представлена измененная конструкция гидроцилиндра со съемными направляющими, изготовленными из разработанного полимерного композита (СВМПЭ + 0,1% УНТ), смонтированных в передней крышке и поршне гидроцилиндра.

В диссертационной работе И. Н. Колодяжной проведены исследования, ставящей целью повышение эффективности уборки картофеля за счет повышения долговечности подшипникового узла поддерживающего ролика

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		104

картофелекопателя КТН-2В применением подшипника скольжения из полимерного материала, обладающего низким коэффициентом трения, высокой способностью сопротивляться износу и высокой коррозионной стойкостью [65].

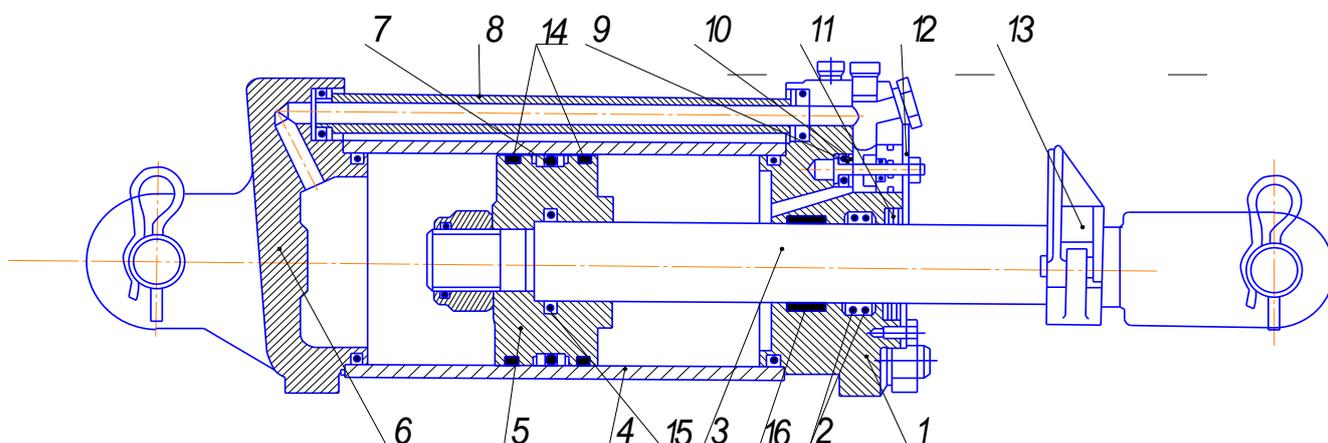


Рисунок 4.7 – Поршневой гидроцилиндр серии С после ремонта: 1–передняя крышка; 2–уплотнение штока; 3–шток; 4–гильза цилиндра; 5–поршень; 6–крышка задняя; 7–уплотнение поршня; 8–маслопровод; 9– гидромеханический клапан; 10–направляющая клапана; 11–грязесъёмник; 12–пластина грязесъёмника; 13–упор клапана. 14– направляющие поршня; 15– защитные кольца; 16–направляющая штока.

Решением данной задачи может стать подшипник скольжения с самоармированием (рис. 4.7) из разработанного оригинального состава на основе СВМПЭ + 0,1% УНТ, обладающий специфическими свойствами.

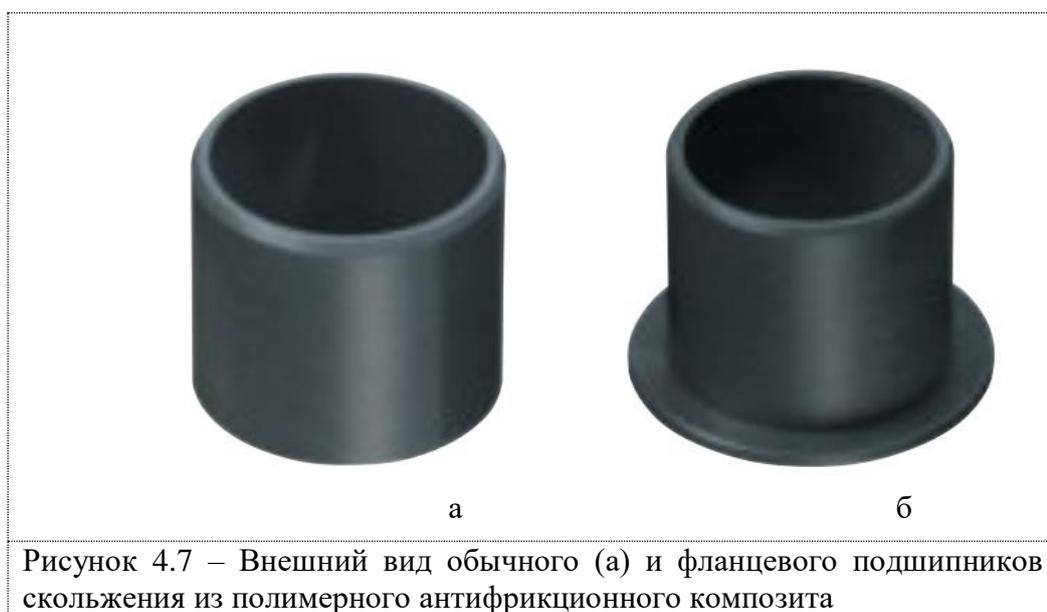


Рисунок 4.7 – Внешний вид обычного (а) и фланцевого подшипников скольжения из полимерного антифрикционного композита

Перспективы коммерциализации.

										Лист
										105
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	МД-02069964-35.04.06-60-18					

После проведения стендовых и эксплуатационных испытаний внедрение результатов может быть осуществлено на малых инновационных предприятиях ООО «Эффект- гарантия» и ООО «Агросервис» Института Механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарева», занимающихся ремонтом объектов с/х техники.

Предварительное изучение рынка показало, что в настоящее время в России существует всего два крупных предприятия, изготавливающих детали гидроцилиндров и подшипники скольжения на основе полимерных антифрикционных композиций – это ООО «ЭрДжиСи-трейд» и ООО «Центр гидроцилиндров».

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		106

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Получены уравнения и проведен теоретический анализ сил, действующих в трибосопряжениях «поршень – гильза цилиндра» и «передняя крышка – шток» силового гидроцилиндра С100/40×200-344 трактора МТЗ 80.

Установлено, что значения сил реакций R и трения $F_{тр}$ деталей штокового и поршневого уплотнительных узлов изменяются в процессе всего рабочего цикла гидроцилиндра, что является причиной неравномерного износа рабочих поверхностей трибосопряжений.

Максимальные значения реакций достигаются в переднем положении поршня и составляют 3850 Н. Контактные напряжения возрастают с ростом износа рабочих поверхностей от 4,35 МПа (при начальной величине зазора 0,091 мм) до 13,7 МПа (зазор 0,4 мм). Отсюда следует, что по мере увеличения зазора между сопряженными деталями скорость изнашивания должна быстро нарастать.

2. Разработана конструкция и изготовлена приставка к лабораторному смесителю периодического действия *PolyLabRheomix 600 OS* для изучения трибологических характеристик антифрикционных композитов на основе СВМПЭ. С использованием данной приставки были получены сравнительные значения коэффициентов трения антифрикционных композитов на основе ПА 6 и СВМПЭ в условиях сухого трения и трения со смазкой при температуре 20 °С, контактном давлении 0,1 МПа и диапазоне скоростей скольжения 0,1 – 0,5 м/с.

Установлено, что в условиях трения со смазкой значения коэффициента трения композитов СВМПЭ более чем в 1,3 раза ниже коэффициентов трения полиамидных композитов.

3. Разработан техпроцесс механохимической активации сухосмешанных композиций СВМПЭ и наноразмерных модификаторов на планетарно-шаровой мельнице «Пульверизетте-7», обуславливающий повышение

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		107

упругопрочностных характеристик СВМПЭ и однородное распределение наночастиц в последнем.

Установлено, что оптимальная длительность обработки сухосмешанных композиций СВМПЭ и наноразмерных модификаторов составляет 67...75 минут.

4. Разработан оригинальный состав композиции на основе СВМПЭ и углеродных нанотрубок (УНТ) фирмы «Tuballmatrixbeta».

Установлено, что ввод 0,1 % УНТ обеспечивает (по отношению к чистому СВМПЭ) повышение предела текучести на 35 %, прочности на 28 %, начального и конечного модулей упругости на 23 % и 29 %, соответственно.

5. В результате триботехнических испытаний в условиях трения со смазкой (при температуре 25 °С, скорости скольжения 0,15 м/с и контактном давлении 2,5 МПа) установлено, что ввод 0,1 % УНТ обеспечивает снижение интенсивности износа СВМПЭ от $2,46 \cdot 10^{-8}$ до $1,85 \cdot 10^{-8}$ отн.ед. При этом интенсивность износа коммерческого полиамидного композита УПА6-15А составила $2,73 \cdot 10^{-8}$ отн. ед.

6. Исследована возможность реализации эффекта самоармирования при изготовлении модели опорно-направляющего кольца гидроцилиндра из разработанного композита методом двухстадийного прессования композиции СВМПЭ с вытяжкой расплава вдоль оси кольцевой полости пресс-формы.

Установлено, что вытяжка расплава в пределах 15...20 % обеспечивает прирост модуля упругости для образцов из СВМПЭ (без м/а) – 9 %; для образцов из СВМПЭ (м/а) – 8 %; для образцов СВМПЭ + 0,1% УНТ (м/а) – 12 %.

7. Разработаны рекомендации по применению разработанного антифрикционного материала в объектах сельскохозяйственной техники.

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		108

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. Справочное пособие. М., Машгиз, 1963, 696 стр.
- 2 Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидрооборудование / Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. М.:, 1982. 420 с.
- 3 Марутов В.А., Павловский С.А. Гидроцилиндры. Издательство «Машиностроение» Москва 1966 год.
- 4 Богданов Л.Б. Гидравлические машины поступательного движения. Москва-Киев, Машгиз, 1958, 164 с.
- 5 Гидроцилиндры [электронный ресурс]. - Режим доступа <https://yandex.ru/images/search?text=силовые%20гидроцилиндры>
- 6 Буренин В.В. Грязесъемники для штоков силовых гидроцилиндров / В.В. Буренин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2000. №11. С. 39-40.
- 7 Технические условия 23.1.174-80. Гидроцилиндры тракторные/ Елецкий завод тракторных гидроагрегатов. 1980. 33 с.
- 8 Осипов П.Е. Гидравлика, гидравлические машины и гидропривод: Уч. Пособие. 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Лесная промышленность. 1981. - 424 с
- 9 Хачатрян Г.Р. Резиновые уплотнители гидравлических устройств с возвратно-поступательным движением / Г.Р. Хачатрян, В.Н. Михайлов; ЦНИИТЭНефтехим. 1987. 48 с.
- 10 Буренин В.В. Уплотнительные кольца и манжеты для силовых гидроцилиндров / Буренин В.В. // СТИН. 1997. №3. С. 24-28.
- 11 Аврущенко Б.Х. Резиновые уплотнители / Б.Х. Аврущенко. Л.: Химия, 1978. 136 с.
- 12 Производство изделий из полимерных материалов: Учеб. пособие / В.К. Крыжановский, М.Л. Кербер, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко. - СПб.: Профессия 2004.- 464 с.

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		109

- 13 Машков Ю.К., Байбарацкая М.Ю., Григорьевский Б.В. М38. Конструкционные пластмассы и полимерные композиционные материалы: Учеб.пособие. - Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. - 129 с.
- 14 Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М: Основы трибологии и троботехники: учебное пособие –М: «Машиностроение» 2008. -206 стр.
- 15 Трение твердых тел [электронный ресурс]. - Режим доступа <http://www.studfiles.ru/preview/4250110/>
- 16 Белый А.В. Трение и износ материалов на основе полимеров. / В.А. Белый, А.И. Свириденюк, М.И. Петроковец, В.Г. Савкин. Минск: Наука. 1976. 432 с.
- 17 Бахарева В.Е., Николаев Г.И., Анисимов А.В. Улучшение функциональных свойств антифрикционных полимерных композитов для узлов трения скольжения//Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И.Менделеева). – 2009. – том LIII. - №4. – С.4-19.
- 18 Полимеры в узлах трения машин и приборов: Справочник / А.В. Чичинадзе, А.Л. Левин, М.М. Бородулин, Е.В. Зиновьев; под общ.ред. А.В. Чичинадзе – М.: Машиностроение. 1988. 328 с.
- 19 Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): учеб. М.: Изд-во МСХА, 2001. 616 с.
- 20 Овандер В.Б. Требования к материалам контактных уплотнений для подвижных соединений гидроцилиндров / Овандер В.Б. // Гидравлика и пневматика. №25. 2007. С. 22-23
- 21 Белый А.В. Трение и износ материалов на основе полимеров. / В.А. Белый, А.И. Свириденюк, М.И. Петроковец, В.Г. Савкин. Минск: Наука. 1976. 432 с.
- 22 Антропова Н.И., Власова К.Н., Самохвалова А.В., Павлова Г.И. Капралон, его получение, свойства и применение. Л.: Наука, 1966.
- 23 Материалы для узлов трения [электронный ресурс]. - Режим доступа http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=1858

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		110

- 24 Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие/ М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г. С. Головкин и др.; под ред. А.А. Берлина – СПб.: Профессия, 2008.- 560 с., ил.
- 25 Промышленные полимерные композиционные материалы / Под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1980. – 472 с.
- 26 Ким В.С. Теория и практика экструзии / В.С. Ким. М.: Химия. 2005. – 568 с.
- 27 Гуль В.Е., Дьякова В.П. – Физико-химические основы производства полимерных пленок// Издательство: [Высшая школа.](#), 1978г.
- 28 Современные методы переработки полимерных материалов. Экструзия. Литье под давлением : учеб.пособие / Ю. Т. Панов, Л. А. Чижова, Е.В. Ермолаева; Владим. гос. университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – Владимир : Издательство ВлГУ, 2013. – 128 с.
- 29 Лукомская А.И., Богаевский М.А., Борисевич Г.М., Калинова Л.Т. Распределение давлений в протекторных резиновых смесях при течении в рисунках пресс-формы. - Каучук и резина, 1973, №8, с. 26-29.
- 30 Шанин Н.П., Колбовский Ю.А., Алексеев А.С. О некоторых закономерностях прессования асбокаучуковых композиций. - Каучук и резина, 1978, №10, с.46-48.
- 31 Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности. Режим доступа: <http://mastermodel.ru/articles/Dyneema>
- 32 Гордеев Ю.И. Перспективные композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, матрично-наполненные сверхтонкими порошками оксида алюминия / Ю.И. Гордеев, А.К. Абкарян, О.В. Ковалевская // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2011. С. 128-132.
- 33 Охлопкова А.А., Андрианова О.А., Попов С.Н. Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями.- Якутск: Якутск. Филиал изд-ва СО РАН, 2003, -306с.

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
						111
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- 65 Г.А.Борисов, А.Н.Колодяжный, И.Н.Колодяжная, М.М.Слугин. Повышение долговечности подшипникового соединения поддерживающего ролика картофелекопателя// Журнал «Механизация, электрификация сельского хозяйства». М.: 2011. №1, с.31
- 66 Малкин А.Я. Методы измерения механических свойств полимеров / А.Я. Малкин, А.А. Аскадский, Коврига В.В. М.: Химия. 1978. – 336 с.
- 67 Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн./Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение. Кн. 2. 1979 – 358 с.
- 68 Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский М.: Машиностроение. 1968. 480 с.
- 69 Малкин А.Я. Методы измерения механических свойств полимеров / А.Я. Малкин, А.А. Аскадский, Коврига В.В. М.: Химия. 1978. – 336 с.
- 70 Водяков В.Н., Чумаков П.В., Величко С.А., Кузнецов В.В., Котина Е.А. Кинематический анализ причин отказов силовых гидроцилиндров автотракторной техники, ТРУДЫ ГОСНИТИ, Том 128, с 47 – 54
- 71 Орлов П.И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х кн. Кн. 1/Под ред. П.Н. Учаева. – Изд. 3-е, испр. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с

					МД-02069964-35.04.06-60-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		115

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н. П. ОГАРЁВА»**

Институт механики и энергетики

Направление подготовки 35.04.06 «Агроинженерия»
(профиль «Машины и оборудование для переработки сельскохозяйственной
продукции»)

РЕЦЕНЗИЯ

на выпускную квалификационную работу

(в форме магистерской диссертации)

студента 212 учебной группы Куликовская Ксения Анатольевна

Тема работы: **«Разработка состава и исследование свойств антифрикци-
онного композита на основе сверхмолекулярного полиэтилена»**

Состав работы: 111 страниц машинописного текста.

**1. Актуальность темы, краткая характеристика исследования и со-
ответствие его содержания заданию на выпускную квалификационную
работу (ВКР).** По данным ГОСНИТИ, областных, краевых и республикан-
ских структур в АПК ежегодно списывается более 340 тыс. силовых гидро-
цилиндров отечественной и зарубежной сельскохозяйственной техники. Зна-
чительная часть отказов обусловлена низким ресурсом трибосопряжений
гидроцилиндров.

В связи с этим квалификационная работа Куликовской К.А., посвящен-
ная разработке новых антифрикционных композитов на основе сверхмолеку-
лярного полиэтилена (СВМПЭ) и технологии изготовления из него деталей
трибосопряжений гидроцилиндров с повышенным ресурсом эксплуатации,
является безусловно актуальной.

Для достижения поставленной цели в работе проведены достаточно
значительные теоретические и экспериментальные исследования:

- проведен теоретический анализ сил, действующих в трибосопряжени-
ях силового гидроцилиндра и установлены максимальных значений контакт-
ных давлений;
- разработана конструкция трибометрической приставки для изучения
трибологических характеристик антифрикционных композитов;
- разработан упрочняющий техпроцесс механохимической активации
компонентов антифрикционных композиционных материалов на основе
СВМПЭ на планетарно-шаровой мельнице «Пульверизетте-7» и установлено
оптимальное время процесса;
- разработаны составы, исследованы физико-механические, трибологи-
ческие и реологические характеристики антифрикционных композиционных

материалов, содержащих СВМПЭ и упрочняющие наноразмерные модификаторы;

- исследована возможность реализации эффекта самоармирования при изготовлении модели опорно-направляющего кольца гидроцилиндра из разработанного композита методом двухстадийного прессования композиции СВМПЭ с вытяжкой расплава вдоль оси кольцевой полости пресс-формы.

- разработаны рекомендации по применению разработанного состава композита СВМПЭ для изготовления антифрикционных деталей силовых гидроцилиндров сельскохозяйственной техники.

Проведенные исследования соответствуют содержанию задания на выпускную квалификационную работу.

2. Соответствие принятых инженерных решений нормативным материалам глубина, полнота и обоснованность решения инженерной задачи: авторские решения соответствуют нормативным материалам и выполнены с использованием известных положений теоретической механики, механики полимеров и технологии переработки полимерных материалов в изделия; экспериментальные исследования выполнены по общим и частным методикам с использованием современного научно-исследовательского оборудования и средств измерений. Экспериментальные исследования произведены с соблюдением необходимых ГОСТов.

3. Качество оформления выпускной квалификационной работы: выпускная квалификационная работа выполнена аккуратно и в соответствии с требованиями, предъявляемыми СТО 006-2014.

4. Положительные стороны работы (новизна разработки, применение информационных технологий, практическая значимость и т.д.).

Научную новизну работы составляют: разработанные составы антифрикционных композиционных материалов на основе СВМПЭ, модифицированного углеродными нанотрубками (УНТ) и нанокристаллическим диоксидом кремния (SiO_2); техпроцесс механохимической активации сухосмешанного состава «СВМПЭ + 0,1% УНТ» на планетарно-шаровой мельнице «Пulверизетте-7»; результаты изучения эксплуатационных и технологических характеристик антифрикционных композиционных материалов на основе СВМПЭ, модифицированного углеродными нанотрубками и нанокристаллическим диоксидом кремния (SiO_2); теоретическое обоснование и конструкция трибометрической приставки к лабораторному смесителю *Rheomix 600 OS*.

Статистическая обработка многочисленных экспериментальных результатов проведена квалифицированно с использованием программы «Microsoft Excel».

5. Что из разработок исследования представляет практический интерес, рекомендуется в производство: практическую значимость представляют разработанные составы антифрикционных композитов и рекомендации по их применению в АПК.

Технологический процесс упрочнения изделий из композита «СВМПЭ + 0,1 % УНТ» методом самоармирования рекомендуется к внедрению в производство после завершения этапа лабораторных и стендовых испытаний.

6. Недостатки и замечания по выпускной квалификационной работе: несколько завышен объем первой главы; целесообразно было бы кроме лабораторных испытаний провести и стендовые испытания рекомендуемых в квалификационной работе антифрикционных деталей для оценки их ресурса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рецензируемая выпускная квалификационная работа отвечает предъявляемым требованиям и заслуживает оценки **отлично**, а её автор Куликовская Ксения Анатольевна достойна присвоения квалификации магистра.

Рецензент

к.т.н., профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина
Александр Николаевич Седашкин



_____ подпись

« _____ »

_____ 2018 г.

Заявление о самостоятельном характере выполнения
выпускной квалификационной работы

Я, Куликовская Ксения Анатольевна магистрант 2 курса, направления подготовки 35.04.06 «Агроинженерия», заявляю, что в моей выпускной квалификационной работе на тему «Разработка состава и исследование свойств антифрикционного композита на основе сверхмолекулярного полиэтилена», представленной в Государственную экзаменационную комиссию для публичной защиты, не содержится элементов неправомерных заимствований.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также ранее защищенных письменных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлена с действующим в Университете Положением о проверке выпускных квалификационных работ студентов ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» на наличие заимствований, в соответствии с которым обнаружение неправомерных заимствований является основанием для неудовлетворительной оценки выпускной квалификационной работы.

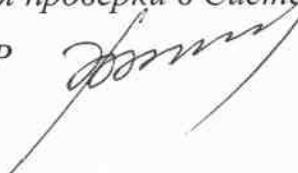
Подпись студента



Дата

Работа представлена для проверки в Системе

Дата представления ВКР



подпись руководителя ВКР

ОТЧЕТ
о результатах проверки
выпускной квалификационной работы на наличие заимствований

Куликовская Ксения Анатольевна

Тема выпускной квалификационной работы: Разработка состава и исследование свойств антифрикционного композита на основе сверхмолекулярного полиэтилена

Руководитель: Водяков Владимир Николаевич

Представленная выпускная квалификационная работа прошла проверку на наличие заимствований в системе «Антиплагиат.ВУЗ»

Результаты автоматической проверки: оригинальность 81,01 %
цитирования 1,08 %
заимствования 17,91 %

Результаты анализа полного отчета на наличие заимствований:

правомерные заимствования: 17,91 %
корректные цитирования: 1,08 %
неправомерные заимствования: нет
признаки обхода системы: нет

Общее заключение об итоговой оригинальности работы и возможности ее допуска к предварительной защите: оригинальность работы составляет 81,01 %. Работа допускается к предварительной защите.

Руководитель
д.т.н., профессор

06.06. 2018



В.Н. Водяков

ОТЗЫВ

о работе над магистерской диссертацией на тему «Разработка состава и исследование свойств антифрикционного композита на основе сверхмолекулярного полиэтилена»
выпускника Института механики и энергетики
Куликовской Ксении Анатольевны
по направлению 35.04.06 «Агроинженерия»

В процессе обучения в магистратуре Института механики и энергетики Куликовская К. А. проявила себя в качестве добросовестного, трудолюбивого и инициативного студента. По всем предметам она имеет оценки «отлично».

Магистерская диссертация Куликовской К. А. посвящена решению актуальной задачи создания новых композиционных материалов для высоконагруженных объектов сельскохозяйственной техники.

При выполнении диссертации был проведен развернутый анализ литературных источников и патентов. Разработаны новые составы и технологические процессы производства и переработки антифрикционных композитов на основе СВМПЭ в антифрикционные детали с/х техники, детально исследованы эксплуатационные и технологические свойства композитов.

Разработанный техпроцесс позволяет получать антифрикционный композиционный материал на основе СВМПЭ, модифицированный углеродными нанотрубками и другими наноразмерными модификаторами с улучшенными трибологическими и упругопрочностными характеристиками.

Значительных недостатков в ходе выполнения магистерской диссертации Ксенией Анатольевной не допущено. Все основные задачи, поставленные перед ней на начальном этапе исследований, успешно решены. По результатам исследований опубликовано 4 работы в изданиях, входящих в базу данных цитирования РИНЦ РФ.

Материал магистерской диссертации, представленной к защите, прошел проверку в системе «Антиплагиат». Итоговая оценка оригинальности: 81,01 %. Справка прилагается.

Считаю, что магистерская диссертация заслуживает отличной оценки, а ее автор, Куликовская К. А., присвоения академического звания «магистра техники и технологий» по направлению подготовки 35.04.06 «Агроинженерия».

Руководитель работы

д. т. н., профессор



В.Н. Водяков