

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»

Институт механизации и технического сервиса

Кафедра эксплуатации и ремонта машин

Направление подготовки – 35.04.06 «Агроинженерия»

Магистерская программа – «Технический сервис в сельском хозяйстве»

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

**ТЕМА: Повышение надежности подшипников скольжения
сельскохозяйственной техники при ремонте с применением
композиционных материалов**

Студент магистратуры



Гайфуллин Р.Р.

Научный руководитель,
к. т. н., доцент



Ахметзянов Р.Р.

Обсуждена на заседании кафедры и допущена к защите
(протокол № 9 от 02.02.2021 г.)

Зав. кафедрой профессор
ученое звание


подпись

Адигамов Н.Р.
Ф.И.О.

Казань-2021

АННОТАЦИЯ

к выпускной квалификационной работе

Гайфуллина Рамля Раеловича

на тему: «Повышение надежности подшипников скольжения сельскохозяйственной техники при ремонте с применением композиционных материалов»

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки на 111 листах машинописного текста и состоит из 4 глав, содержит 35 рисунков, 12 таблицы и, включает введение, анализ состояния вопроса, теоретические исследования, методику экспериментальных исследований, результаты экспериментальных исследований, основные выводы и рекомендации, список цитируемой литературы содержит 73 источника.

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель работы, задачи исследования, апробация работы.

В главе 1 «Анализ состояния вопроса» рассмотрены различные виды подшипников в машинах, вопросы изнашивания деталей в сельскохозяйственных машинах, свойства и применение различных углеродных композитов. Произведены выбор и постановка задач исследования.

В главе 2 «Теоретические исследования» рассмотрены общие вопросы трения в машинах, определение температурного режима работы композиционного материала для подшипников скольжения.

В главе 3 «Методика экспериментальных исследований» приведены характеристики экспериментального оборудования, методика изготовления образцов, методика трибологических испытаний полученных образцов

В главе 4 «Результаты исследований» приведены результаты трибологических испытаний, определены зависимости температурного режима работы образцов и их износа.

Работа заканчивается выводами и рекомендациями и списком использованных источников.

ABSTRACT

of the final qualifying work

Gayfullin of Ramil Railovich

topic: "Improving the reliability of agricultural machinery sliding bearings during repairs using composite materials»

Final qualifying work consists of the explanatory note to 110 sheets of typewritten text and consists of 4 chapters, contains 35 figures, 12 tables, and includes the introduction, the analysis of the state of the question, theoretical research, experimental method, experimental research results, the main conclusions and recommendations, bibliography contains 73 sources.

In the introduction, the relevance of the work is justified, the purpose of the work, the tasks of the research, and the approbation of the work are defined.

In Chapter 1, "Analysis of the state of the issue", various types of bearings in machines, issues of wear of parts in agricultural machines, properties and applications of various carbon composites are considered. Selection and formulation of the objectives of the study.

In Chapter 2, "Theoretical studies", general issues of friction in machines, determination of the temperature mode of operation of a composite material for plain bearings are considered.

In Chapter 3, "Methods of experimental research", the characteristics of experimental equipment, the method of manufacturing samples, and the method of tribological testing of the obtained samples are given

In Chapter 4 "Research results", the results of tribological tests are presented, the dependences of the temperature mode of operation of the samples and their wear are determined.

The work ends with conclusions and recommendations and a list of sources used.

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

ВВЕДЕНИЕ	6
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА	9
1.1 Условия работы подшипниковых узлов на сельскохозяйственных машинах	9
1.2 Анализ антифрикционных материалов, используемых на подшипниках скольжения	15
1.3 Роль серы и сульфидов в узлах трения скольжения	23
1.4 Самосмазывающиеся материалы, покрытия и их свойства	27
1.5 Основные выводы, цели и задачи исследования	30
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	33
2.1 Обоснование состава антифрикционного композиционного материала для подшипников скольжения	33
2.2 Расчет характеристик подшипников скольжения по заданным физико-механическим свойствам поверхности трения	38
2.2.1 Расчет теоретического срока службы	40
2.2.2 Расчет грузоподъемности подшипника	48
2.2.3 Повышение температуры при трении	50
2.2.4 Расчет по критерию теплостойкости	51
2.3 Зазор подшипника и монтажные допуски	52
2.4 Выводы по разделу	53
3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	55
3.1 Методика формирования и получения лабораторных образцов композиционных материалов	55
3.1.1 Материалы состава и их характеристики	56
3.1.2 Методика получения образцов композиций	57
3.1.3 Планирование состава и режимов изготовления композиций	59
3.1.4 Оборудование для изготовления и испытания композиционного материала	64
3.2 Методика лабораторных испытаний опытных образцов	66
3.2.1 Методика определения прочностных характеристик опытных образцов	66

3.2.2 Методика определения на водопоглощение	67
3.2.3 Методика определения износостойкости	67
3.3 Методика определения и регистрации тепловых изменений, натуральных образцов	69
3.4 Методика проведения эксплуатационных исследований подшипников скольжения	70
3.5 Выводы по разделу	74
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ	75
4.1. Определение составов и получение образцов композиционных материалов	75
4.1.1. Влияние температуры на прочность и плотность образцов	76
4.1.2. Влияние давления прессования на прочность	78
4.1.3. Влияние времени термобработки на прочность и плотность образцов	79
4.1.4. Влияние размеров частиц наполнителей на прочность и плотность образцов	80
4.1.5. Влияние соотношений состава на прочность образцов	81
4.2. Испытание опытных образцов композиций по их физико-механическим характеристикам	84
4.3 Регистрация и определение взаимосвязи тепловых характеристик с параметрами износостойкости опытных образцов	88
4.3.1 Исследования влияния нагрузки и продолжительности на массовый износ	89
4.3.2 Исследования влияния нагрузки и продолжительности на температуру нагрева	91
4.4. Разработка технологии изготовления подшипников скольжения Технико-экономическая оценка	94
4.4.1 Разработка технологического процесса изготовления подшипников скольжения	94
4.4.2 Технико-экономическая оценка предлагаемой разработки	96
4.5 Выводы по результатам исследований	102
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	104

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Надежность машинно-тракторного и автомобильного парков агропромышленного комплекса Российской Федерации во многом обуславливается работоспособностью узлов трения современных конструкций сельскохозяйственной техники, в составе которых имеются многочисленные примеры высоконагруженных подшипников скольжения (ПС) типа «втулка» с ограниченным ресурсом, определяющим эксплуатационные возможности всего технического объекта. Повышение работоспособности узлов трения сельскохозяйственной техники является первостепенной задачей машиностроительного и ремонтного производств.

В последние годы при проектировании отдельных узлов и механизмов в сельскохозяйственных машинах, стали широко применяться композиционные материалы.

Композиционные материалы характеризуются высокими технологическими свойствами, коррозионной стойкостью, хорошей адгезионной способностью различными по своей природе материалами, хорошей обрабатываемостью и демпфирующей способностью. По данным ГОСНИТИ полимеры позволяют снизить себестоимость работ на 15...20%, трудоемкость ремонта машин на 20...30%, сократить расходы черных и цветных металлов на 40-50%.

Вопросами повышения долговечности подшипникового узла из полимерных материалов занимались такие ученые как В.В. Курчаткин, Р.И. Ли, Р.Г. Мирзоев, Д.Д. Ремизов, С.Б. Ратнер, А.В. Чичинадзе и другие.

В настоящей работе предлагается в узлах трения сельскохозяйственных машин использовать подшипник скольжения из композиционного материала взамен серийных подшипников качения и пластмассовых, а также металлокерамических подшипников скольжения. Основная причина разрушения подшипника качения - это контактная усталость металла, проявляющаяся в выкрашивании частиц и отслаивания тонких пластин с

рабочих поверхностей деталей. При этом на поверхностях сопряжения возникают дефекты в виде мелких язв. Также при попадании влаги в процессе эксплуатации и во время хранения происходит окисление рабочих поверхностей, что в конечном итоге приводит к коррозии и заклиниванию подшипника.

Выбор полимерного материала производится исследованием технологии его получения, свойств методом испытаний на прочность, износостойкость, которые проводятся на универсальной машине QASAR100 и на машине трения 77 – 1 HT.

Цель работы - Повышения долговечности подшипников скольжения в узлах трения из серографитовых композиционных материалов, обладающих низким коэффициентом трения, высокой способностью сопротивляться износу и высокой коррозионной стойкостью для замены стандартных подшипников при изготовлении и проведении ремонта машин.

Задачи исследования:

1. На основании анализа физико-механических свойств и требований для материалов используемых в подшипниках скольжения выделить группу свойств определяющих их надежность;
2. Разработать материал подшипника скольжения, обладающего достаточной для рассматриваемых узлов трения работоспособностью в условиях повышенных нагрузок, скорости и скольжения и абразивной среды;
3. Исследовать возможность повышения физико-механических свойств композиционных материалов технологическими мероприятиями;
4. На основе экспериментальных исследований выявить закономерность трения и изнашивание материалов в паре со сталью;
5. Разработать технологию изготовления подшипников скольжения из композиционных материалов и провести оценку технико-экономической эффективности.

Апробация работы:

Результаты работы докладывались и обсуждались на международной научно-практической конференции Института механизации и технического сервиса «Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы. Труды III международной научно-практической конференции.» (Казань, 2019.)

«Современное состояние, проблемы и перспективы развития механизации и технического сервиса агропромышленного комплекса. » Материалы международной научно-практической конференции Института механизации и технического сервиса. (Казань, 2019.)

«Современные достижения аграрной науки. научные труды всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 80 летию д.с.-х.н., профессора, член-корр. РАН, почетного члена АН РТ, академика АИ РТ, трижды Лауреата Государственных и Правительственной премии в области науки и техники, Заслуженного деятеля науки РФ, Заслуженного работника сельского хозяйства РТ Мазитова Назиба Каюмовича. »Казанский государственный аграрный университет (Казань, 2020.)

«Научное сопровождение технологий агропромышленного комплекса: теория, практика, инновации. Научные труды I-ой Международной научно-практической конференции. » (Казань, 2020.)

Публикации. Основные положения работы изложены в 5 печатных работах в сборниках трудов международных конференций

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

1.1 Условия работы подшипниковых узлов на сельскохозяйственных машинах

Наиболее уязвимым с точки зрения износа элементом любой машины или механизма являются металлические подшипники. Износ подшипника очень часто служит причиной остановки агрегата на ремонт.

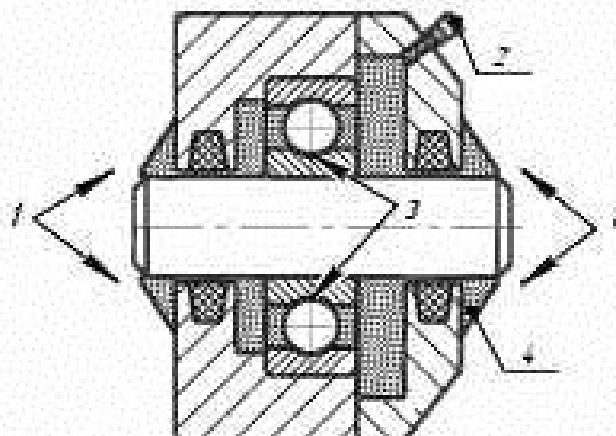
Как известно работоспособность подшипниковых узлов сельскохозяйственных машин зависит от микроклимата окружающей среды, степени нагруженности и скоростных режимов.

На подшипниковые узлы машин и оборудования животноводческих и птицеводческих помещений влияют резко меняющийся в течение суток температурный и влажностный режимы, загазованность. На почвообрабатывающие, посевные, зерно — и кормоуборочные сельскохозяйственные машины — повышенная запыленность, влажность воздуха, присутствие всевозможных органических кислот, солнечная радиация, атмосферные осадки и ветер. При перепаде температур на металлических поверхностях машин и на внутренней части корпуса подшипников накапливается конденсируемая влага, которая перемещается со смазкой при вращении колец подшипника, разжижает его и теряется смазочная способность.

Циркулирующий воздушный поток, образуемый вращением рабочих органов машин, захватывает абразивные частицы органического происхождения и продувает через щели в корпусах и сальниковых уплотнениях подшипников. Продуваемые частицы прилипают к слою смазки, который с наружи, и наружный слой смазки уплотняется и свободно пропускает внутрь подшипникового узла механические частицы. Частицы прилипают к внутренним слоям смазки, оседают на беговые дорожки, тела качения, сепаратор, перемещаются полностью с основной смазкой и

начинают действовать как абразив, а совсем мелкие частицы, перемещаясь с пластичной смазкой, образуют пастообразную массу, которая действует на кольца подшипника как пригирочная паста. В результате чего значительно увеличивается радиальный зазор и происходит осевое перемещение подшипника.

На рисунке 1.1 показаны пути проникновения примесей в подшипниковый узел



1 - из обрабатываемого материала; 2 - со смазочным маслом; 3 - продувки носом; 4 - уплотняющее кольцо смазки

Рисунок 1.1 - Пути проникновения абразива и других примесей в подшипниковый узел.

В некоторых машинах животноводческих ферм и рабочих органах подшипниковые узлы контактируют с водой, жижей, с различными жидкими кормами и влажной почвой. Уплотняющий материал постепенно стареет, твердеет становится крупным или, наоборот размягчается, делается рыхлым и начинает пропускать воду и другие засоряющие вещества внутрь подшипникового узла, приводя к интенсивному вымыванию смазки, к коррозии и износу элементов подшипника качения. Другой путь проникновения механических примесей в подшипниковый узел – вместе со смазочным материалом в момент смазывания через пресс – масленки. Механические примеси состоят из абразива, пылевидных частиц неорганического и органического происхождения, металлических и окисных частиц, воды, кислот, щелочей и т.п. [72].

Предельное значение концентрации абразивных частиц составляет 1,5...2%. При превышении этого значения подшипниковые узлы промывают и полностью заменяют смазку. Для большей части сельскохозяйственных машин эти работы проводят в процессе ремонта, а в труднодоступных для смазывания местах это и вовсе не происходит и подшипники, просто заменяют новыми. Поэтому вынуждены применять в подобных узлах подшипники скольжения.

По опыту эксплуатации подшипниковых узлов трения скольжения на различных машинах видно, что около 70% подшипников скольжения работают без смазки или при граничной смазке в основном в абразивной или водной среде это связано конструктивными или технологическими параметрами машин. В таких условиях использование обычных антифрикционных материалов не может обеспечить длительную работоспособность машин вследствие высокого трения и износа.

В узлах трения скольжения сельскохозяйственных машин подшипники выходят из строя примерно 50% от запланированного ресурса, это связано со специфическими условиями эксплуатации, которая характерна для данной отрасли, подшипники в таких условиях подвергаются комплексным негативным воздействиям. Выход из строя сельскохозяйственных машин приводит к значительным потерям урожая это связано с многократными ремонтами и простоями техники в ответственный время.

При граничной смазке смазочный слой разрывается и появляется контакт между неровностями поверхности. Такой контакт между деталями приводит к схватыванию и заеданию вследствие чего теряется работоспособность подшипника.

При непостоянной нагрузке подшипников скольжения в разный момент времени нагрузка различна и изменения нагрузки на подшипник меняет вид трения, например при одной нагрузке может работать в режиме жидкостного трения, а при другой может выдавливать смазочный слой и образовывать металлический контакт, вследствие чего будет возникать схватывание. А

также меняться направление вращения подшипника скольжения или вала, что может привести к усталостному разрушению поверхностного слоя.

В абразивной среде начинается механическое удаление частиц основного материала, которое существенно увеличивает скорость изнашивания.

На работоспособность подшипника скольжения влияют все перечисленные факторы, воздействующие на материал подшипника, схема взаимодействия которых представлена на рисунке 1.2.

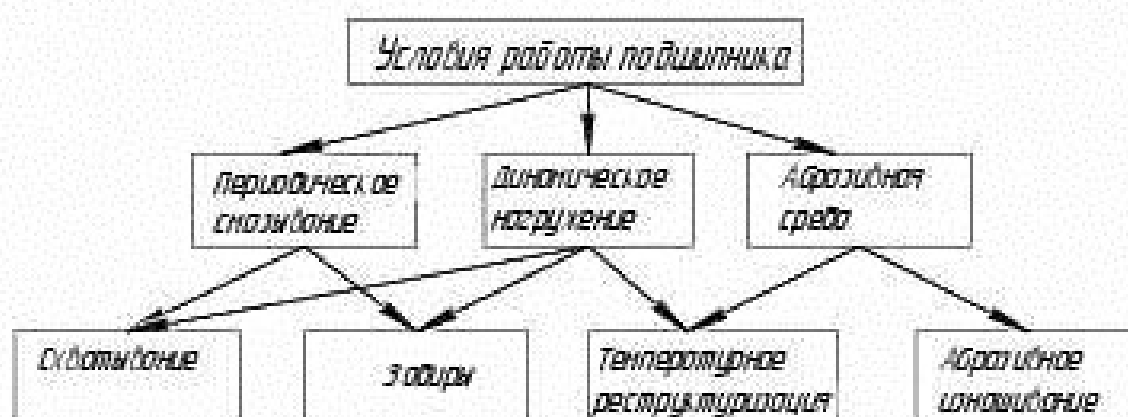


Рисунок 1.2 – Виды повреждений подшипников скольжения

Это характерные повреждения, которые встречаются в практике, но не единственные для условий работы подшипников сельскохозяйственной техники, основной проблемой является повышение температуры в зоне трения скольжения, выделение большого количества теплоты и интенсивное абразивное изнашивание.

Выделение большого количества теплоты приводит к изменению структуры металлов, а неметаллических материалов меняется агрегатное состояние, это например термическое разложение, пластификация.

Работа подшипников сельскохозяйственных машин в абразивной среде требует применение износостойких материалов, которые стойки к абразивной среде и в случае попадания абразивных частиц в зону трения скольжения поглощать в себя абразивные частицы. Повысить стойкость к абразивной среде возможно применив узлы сухого трения скольжения без

смазывания консистентными смазками за счет применения самосмазываемых композиционных материалов.

Известно, что в сельскохозяйственной технике абразивные материалы повышают интенсивность изнашивания узлов трения. Абразив опасен для подшипников скольжения тем, что при попадании его в узел трения он измельчается вследствие дробления и, тем самым обволакивает всю поверхность трения. Дробление абразива можно исключить путем снижения предела текучести одного из материалов.

Полимеры и цветные металлы имеют повышенную деформативность, что позволяет избежать нежелательного дробления абразивов. Если частицы абразива не разрушаются, то полимерами они ведут себя иначе, по сравнению с мягкими металлами они не столь интенсивно приводят к изнашиванию [54].

При попадании абразивной частицы в контакт подшипника скольжения необходимо рассматривать тройственную систему «металл – абразив – композиционный материал», процессы трения в сопряжениях происходят металл – абразив, композиционный материал – абразив, полимер – металл. Минимальному износу полимера и металла необходимо стремиться регулируя свойства сопряженных элементов.

Н.А. Буше и В.В. Копытько считают, что основную роль при трибологическом взаимодействии пар трения играет совместимость материалов, основным требованием которой является способность удерживать смазочный слой, а если слой разрушен, то способность сопротивляться схватыванию.

Материалы считаются совместимыми, если имеют хорошую прирабатываемость, разнородность для исключения возникновения схватывания, способность образовывать, удерживать и восстанавливать смазочную пленку, что очень характерно для не металлических материалов. [55]. Кроме того что материалы совместимы втулка еще должна обладать

хорошими физико – механическими свойствами такими как прочность на сжатие, твердость, плотность, модуль упругости, ударная вязкость и др.

Подшипники, работающие в условиях динамического нагружения также должны играть роль гасителя вибраций. Выбирая материал и учитывая все свойства также необходимо помнить о себестоимости, технологичности и экологичности материала.

В связи с этим замена в узлах трения машин и механизмов антифрикционных металлов более дешевыми и долговечными полимерами становится весьма актуальной. Однако имеются также и недостатки полимерных материалов, это низкая теплопроводность, термостойкость, что ограничивает значение допустимых скоростей и нагрузок на подшипник [56].

Такие недостатки устранимы и имеются различные методы повышения физико – механических и теплопроводных свойств материала это, например применением различных наполнителей и армированием материала.

В литературе [57] отмечается что, наполняя фторопласт графитовым наполнителем можно повысить допускаемые значения $[p_v]$ в 5 раз при $[T] < 250^{\circ}\text{C}$. Очень распространенный метод для повышения теплофизических и механических свойств материалов армирование металлическими и синтетическими нитями.

В литературе [58] рассматривается разработка антифрикционного композита на основе фторопласта, где применяется пространственное армирование, вследствие чего увеличивается теплопроводность подшипника. [59]. Также теплопроводность повышается конструктивно это можно достичь методом нанесения тонкослойного покрытия на металлический подшипник, при этом значительно снизится коэффициент трения и повысится теплопроводность [60], либо пропитать полученный спеченный пористый материал суспензией фторопласта [59]. Подшипники, пропитанные фторопластом, работают в условиях ограниченного смазывания и различных ударных воздействиях.

В работе [61] отмечено, что также для повышения теплопроводности и термостойкости фторопласта можно добавить в состав порошки алюминия и графита.

Температура между трущимися поверхностями повышается вследствие больших сил трения, если при повышении температуры между трущимися поверхностями будут снижаться силы трения, то температура значительно снизится, для этого необходимо применить материал обладающий свойствами снижения сил трения при повышении температуры. Таким свойством может обладать материал способное выделять из своей структуры вещество снижающее коэффициент трения. Если взять, к примеру, материал содержащее серу то в процессе трения сера способна образовать сульфидные соединения вследствие высоких температур и механического воздействия. Таким материалом может стать серографитовый композиционный материал способное выделять в процессе трения серографитовую эмульсию на поверхность трения, что значительно снизит температуру в зоне контакта трения.

1.2 Анализ антифрикционных материалов, используемых на подшипниках скольжения

Анализируя эффективного применения композиционных материалов для подшипников скольжения, проводился обзор литературы, в которых рассматривались работы направленные на трибо – технологических свойств металлополимерных и неметаллических материалов.

Результатом обзора является установка основных достоинств и недостатков имеющихся на сегодняшний день материалов. В ряде случаев подшипники качения значительно уступают подшипникам скольжения, особенно в сельскохозяйственных машинах где нет возможности смазывания консистентными смазками в условиях загрязнения абразивными частицами и лучше всего применить узлы сухого трения скольжения, а также подшипники

скольжения имеют значительно малые габариты, удобство расположения в пространстве учитывая особенности конструкций, значительно меньший вес и т.д.

Значительное распространение в качестве подшипниковых материалов для сельскохозяйственных машин получили неметаллические материалы (резины, твердые породы дерева и пластмассы), потому что они обладают хорошими антифрикционными свойствами в паре со стальной или чугунной цапфой. Среди пластмасс для подшипников используют текстолиты, древесно-слоистые пластины, капрон, фторопласт и т.д. Такие подшипники могут работать при смазке водой, особенно негерметизированных или слабогерметизированных подшипниковых узлов сельскохозяйственных машин. Примером могут служить деревянные подшипники опор клавишей соломотряса зерноуборочных комбайнов.

Применяя подшипники скольжения из неметаллических материалов, значительно увеличивается межремонтный срок машин т.к. подобные материалы сохраняют работоспособность даже при больших динамических нагрузках.

Подшипники скольжения начали использоваться только благодаря глубоким исследованиям механизма изнашивания поверхностей скольжения и факторов, влияющих на него. Проблемами износа, в общем, занимались Крагельский И.В., Чичинадзе А.В., Буше Н.А., Карасик И.И., Семенов А.П., Позняк Э.Л., Гриб В.В., Памфилов Е.А., Любарский И.М. и др.

Проблемами износа металлических материалов занимались Белый В.А., Белый А.В., Потосян А.К., Мьшкян Н.К., Гороховский Г.А., Свириденко А.И., Фасхутдинов Х.С., Шайхутдинов Р.Р. и др., полимерными материалами Купчинов Б.И., Курчаткин В.В., Ли Р.И., Пучин Е.А., Баусов А.М., Гвоздев А.А. и др.

Исследования в этих областях ведут к созданию новых материалов антифрикционного назначения, совершенствованию конструкции подшипника, выявления совместимости материалов.

Антифрикционные материалы, применяющиеся в подшипниковых узлах должны удовлетворять некоторым требованиям [59], которые можно изложить следующим образом.

- Износостойкость материала должна быть высокой по сравнению со сплавами из цветных металлов, применяемые для подшипников скольжения,
- Основная деталь должна изнашиваться на много меньше подшипника скольжения,
- Подшипники из таких материалов должны оставаться работоспособными даже в случае попадания в зону трения различных сред препятствующих смазочным свойствам.
- Подшипники должны оставаться работоспособными даже при температуре выше 30°C .
- Коэффициент трения материала должна быть ниже сплавов из цветных металлов.
- Материалы должны быть недорогими, мало дефицитными, нетоксичными.
- Изготовление деталей из таких материалов должны быть удобными и менее трудоемкими.

Если материалы будут отвечать этим требованиям, то снизится себестоимость, трудоемкость изготовления подшипников скольжения, повысится надежность работы, упростится эксплуатация и ремонт.

Среди имеющихся металлических подшипников скольжения в основном встречаются чугунные, алюминиевые, медные оловянные. А если рассматривать неметаллические, то это в основном композиции на основе графита, пластмасс, резины, прессованной древесины пропитанной маслом [64].

Применение полимерных материалов в технике началось еще в глубокой древности. Первыми пластическими материалами, которые были использованы для нужд строительства и изготовления примитивных машин и сооружений, были растительные смолы, глинистое тесто, битум и т.п.

Пластические массы в современном понимании стали впервые изготавливаться около 100 лет тому назад. Применение их в технике стало возможным благодаря огромным успехам химии высокополимеров, в дело развития которой внесли большой вклад работы отечественных ученых: А.М.Бутлерова, А.Е. Фаворского, С.В. Лебедева, Н.Д. Зелинского, С.Н. Ушакова, Г.С. Петрова и многих других.

Область применения полимерных материалов в технике достаточно разнообразна, остановимся лишь на применении их в качестве антифрикционных материалов для изготовления подшипников скольжения машин.

Неметаллические подшипники скольжения известны с давних времен. История их начинается с применения в узлах трения некоторых пород дерева.

Подшипники из дерева, применялись в течение многих столетий, как правило, они смазывались водой и другими смазочными материалами. Лучшим древесным материалом для подшипников скольжения был бакаут импортная тропическая древесина. "Железная береза" или фисташковое дерево, произрастающее в России, наиболее подходит по своим свойствам к бакауту и дают незначительный износ, но их высокий коэффициент трения делает эксплуатацию таких подшипников невыгодной [40]. С развитием металлургии и машиностроения требования к прочности, форме, размерам детали и т.п. возросли, и дерево начали заменять металлами. Однако, в некоторых механизмах твердые породы дерева успешно конкурировали с металлами, особенно, если в них в качестве смазки применялась вода.

Б.А. Архангельский в обзоре изобретений в области применения пластмасс [41] указывает, что с 1915 по 1925 г.г. использование пластиков в качестве антифрикционного материала не имело широкого распространения, но уже с начала 30-х годов прошлого столетия начали изготавливать подшипники скольжения, из синтетических смол наполняя и модифицируя с

различными неорганическими и органическими соединениями. Одним из таких материалов является текстолит.

Текстолит - слоистый пластический материал, получаемый путем пропитки ткани связующим, обычно, фенолформальдегидной смолой, не утратив значения в соответствующих конструкциях и до настоящего времени. Первые данные о применении текстолита относятся к 1932г., а в 1933-1934 гг. он уже широко применялся при изготовлении вкладышей прокатных станков и подобных им механизмов. Экспериментальными работами в период 1930-1933 гг. было доказано, что текстолит в тяжело нагруженных подшипниках скольжения со смазкой водой работает лучше всех известных в то время материалов: бронзы, баббита, бакаута. Это послужило началом быстрого и успешного внедрения текстолитов. Одновременно с этим изыскиются и создаются новые полноценные заменители цветных металлов. Так, стремление заменить дорогостоящую ткань, являющуюся основной составной частью текстолитов, на более дешевый материал привело к применению в качестве наполнителя древесной муки, бумаги. Однако, эти композиции, в виду малой их грузоподъемности, не нашли достаточного применения.

Наконец, в 1937 году обращается внимание на материал, имеющийся в изобилии в нашей стране - на древесину. Создаются подшипники скольжения из ластифицированной древесины - лигностана, а затем и из древесно-слоистых пластиков (ДСП), применение которых было достаточно успешным [42].

У древесно-слоистых пластиков или древесных пластмасс общим признаком является то, что они изготавливаются путем горячего прессования, с использованием пластических свойств древесины [43]. Эти материалы обладают большей плотностью, повышенными и более однородными физико-механическими свойствами, а также значительно большей влаго- и грибоустойчивостью чем древесина. Их относительно высокая механическая прочность, низкий коэффициент трения и хорошая

износостойкость позволили древесно-слоистым пластикам, наряду с текстолитами, приобрести в некоторых областях техники самостоятельное значение и занять достойное место как новому конструкционному материалу.

Огромные успехи, достигнутые в последнее время высокомолекулярной химией, открывшей множество новых замечательных полимерных материалов, так как полиамиды, политетрафторэтилен и многие др., позволили приступить к использованию их, как конструкционных материалов, во многих ответственных узлах и деталях современных машин, в том числе и в подшипниках скольжения.

Полиэапролактан (капрон), являющийся представителем группы полиамидных смол, получил наибольшее распространение во многих отраслях машиностроения. Первые сообщения о новом классе синтетических материалов - полиамидах относятся к 1938 г., а уже в 1941 г. они были использованы для изготовления методом литья под давлением технических деталей (в том числе и подшипников скольжения) [44].

Полиэапролактан, обладающий высокой прочностью, теплостойкостью, упругостью, хорошими антифрикционными свойствами и достаточной адгезией ко многим металлам, а также малым удельным весом и способностью легко перерабатываться в изделия, является одним из наиболее пригодных материалов для применения в узлах трения различных машин в качестве антифрикционного материала.

Политетрафторэтилен (фторопласт-4) обладает наиболее низким коэффициентом трения из всех известных материалов. Коэффициент трения его без смазки равен 0,03-0,04 [45], но износостойкость его в чистом виде совершенно не достаточна, особенно, при чистоте обработки сопряженной с ним детали ниже 10 класса. Низкая механическая прочность политетрафторэтилена, приводящая к холодной текучести материала уже при удельных давлениях около 0,3-0,5 МПа, низкая адгезия к металлам, длительная деформация материала под действием остаточных напряжений значительно затрудняют его применение в чистом виде. Поэтому

использование его в подшипниках скольжения ограничено и возможно лишь при армировании более прочными материалами, например, стекловолокном, или пропитывая им пористые материалы (пористую бронзу и т.п.) [46], т.е. при достаточно сложной технологии изготовления.

Преимущества применения этих материалов в качестве антифрикционных, для изготовления подшипников скольжения следующие:

1. Низкий коэффициент трения при не совершенной смазке;
2. Обеспечение положительного градиента механических свойств по глубине за счет размягчения поверхностного слоя полимера под действием тепла, генерируемого при трении или за счет выделения смазывающе-охлаждающего агента из самого материала;
3. Прирабатываемость, т.е. способность материала компенсировать неточность изготовления узла трения и другие геометрические погрешности;
4. Способность поглощать разные инородные частицы, предотвращая тем самым задиры и износ вала;
5. Стойкость против воздействия воды, смазок и различных агрессивных сред;
6. Достаточно большая прочность на сжатие;
7. Износостойкость;
8. Обеспечение снижения пиков динамических нагрузок и возникающих в системе колебаний;
9. Небольшой объемный вес;
10. Высокая технологичность.

К основным недостаткам этих материалов относятся

1. Повышенный коэффициент объемного расширения, значение которого в 3-10 раз выше, чем у антифрикционных металлических сплавов;
2. Гигроскопичность и тенденция к набуханию в процессе эксплуатации, что приводит к изменению размеров и физико-механических свойств (поглощение влаги составляет 3-12%);

3. Более низкая термическая стойкость, чем у металлов, достигающая в зависимости от природы пластика 60-35 СРС;
4. Пониженная теплопроводность, в 500-600 раз меньше по сравнению с металлами;
5. Отсутствие постоянных значений деформации при действии постоянного напряжения (если даже это напряжение мало).

Зафиксировано много положительных моментов по применению полимеров, но подобные материалы в основном имеют большую стоимость и очень часто не отвечают современным требованиям. Поэтому открывается такая необходимость заменить их на менее дефицитные и более износостойкие композиционные материалы [48,49].

Как компонент антифрикционного материала можно применить серу и его соединения. Сера и его соединения в значительной степени влияют на антифрикционные свойства материалов. Появление серы на трущихся поверхностях значительно снижает износ и предотвращает схватывание. Сера и его соединения, как и графит, позволяют устранить заедание при условиях повышенных температур и нагрузок [63].

Впервые серу как компонент спеченных антифрикционных композиционных материалов применили в 1953 г., когда было предложено пропитать поры спеченного железного порошка расплавленной серой. Сера является одним из крупнотоннажных видов химического сырья. В мире производство серы составляет около 58 млн. тонн, в России - более 5 млн. тонн [1,2,3]. В настоящее время сера производится значительно больше, чем потребляется. Это объясняется производством попутной (регенеративной) серы при переработке нефти и газа которые содержатся в них в избытке, а также много серы выделяется при глубокой очистке продуктов нефтепереработки. В связи с этим остро встает вопрос о разработке новых областей применения серы, что в свою очередь даст возможность снизить стоимость подшипниковых материалов и улучшить их антифрикционные свойства.

1.3 Роль серы и сульфидов в упрочнении скольжения

Элементарная сера невероятно богата Землей и добывалась для различных целей в течение тысяч лет. До начала 1900-х годов наиболее распространенным источником серы была почва, окружающая вулканы, - главным образом почва, окружающая вулканы на острове Сицилия в

Средиземном море. Благодаря своему изобилию, а также своим уникальным свойствам, сера стала критически важным активом для множества продуктов, начиная от древней бронзы и заканчивая порохом 18-го века и современной серной кислотой. В начале и середине 20-го века, многие исследовательские усилия были сосредоточены на понимании фаз серы. Сера существует в виде желтого орторомбического кристаллического твердого вещества при температурах приблизительно менее 96 °C. При температурах от 96 °C до 116 °C существует моноклинная кристаллическая твердая форма серы, хотя она и сохраняет свой желтый цвет. Как орторомбическая, так и моноклинная версии серы в основном содержат серу в виде колец S₈, но кольца упакованы по-разному, чтобы дать различные типы кристаллов. При нагревании примерно до 120°C сера начинает плавиться в желтую жидкость. Примерно в 159°C происходит драматический сдвиг в его поведении: формируются цепи серы, когда кольца S₈ начинают раскрываться, и сера становится аморфным вязким материалом. Дальнейшее нагревание приводит к увеличению вязкости, в то время как ее цвет темнеет от желтого до оранжевого и в конечном итоге до красного. Вместо того, чтобы испаряться, как это делают многие другие элементы при повышенной температуре, вязкая сера полимеризуется при температуре около 200 °C в твердый материал, который кажется красным по цвету. При охлаждении эти переходы происходят в обратном порядке, аморфный, красный, твердый полимер в конечном счете, превращается обратно в орторомбическое желтое твердое тело при низких температурах. Следует отметить, что даже измененный цвет серы скрывает в себе полимерную серу, которая в самом

является на самом деле желтый, а не красный, внешний вид, следовательно можно прийти к выводу, что в целом красный вид возникает из-за присутствие органических примесей, или небольших молекул серы S_2 и S_4 .

Даже с его уникальными температурно-зависимыми фазами, элементарная сера, как правило, безвредна. Однако при правильных условиях сера также хорошо известна тем, что образует соединения с многочисленными другими элементами, включая свинец, образуя сульфид (PbS), кальций с образованием гипса ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}(H_2O)$), железо с образованием пирита (FeS_2) и даже водород с образованием вредного сероводородного газа (H_2S). Способность серы сочетаться со многими другими элементами добавляет возможность к обширным и разнообразным способам, которыми она ведет себя и к самому элементу. Эта способность соединяться с другими элементами также затрудняет извлечение серы и понятие ее на элементарном уровне не представляли в давние времена.

На самом деле это было только в 18 веке химиком Антуаном Лавуазье начал свою работу с серы, которая раньше не считалась соединением и была, наконец, признана элементом. С этого времени, интерес в серу, и многие способы, которыми его можно использовать, процветал. От кластеров сернистого железа до дисульфида молибдена, от проводящих полимеров на основе тиофена до аминокислот цистеина и метионина сера присутствует всегда.

Сегодня элементарная сера в основном извлекается как основной побочный продукт переработки нефти и очистки природного газа процессы (рисунке 1.3).

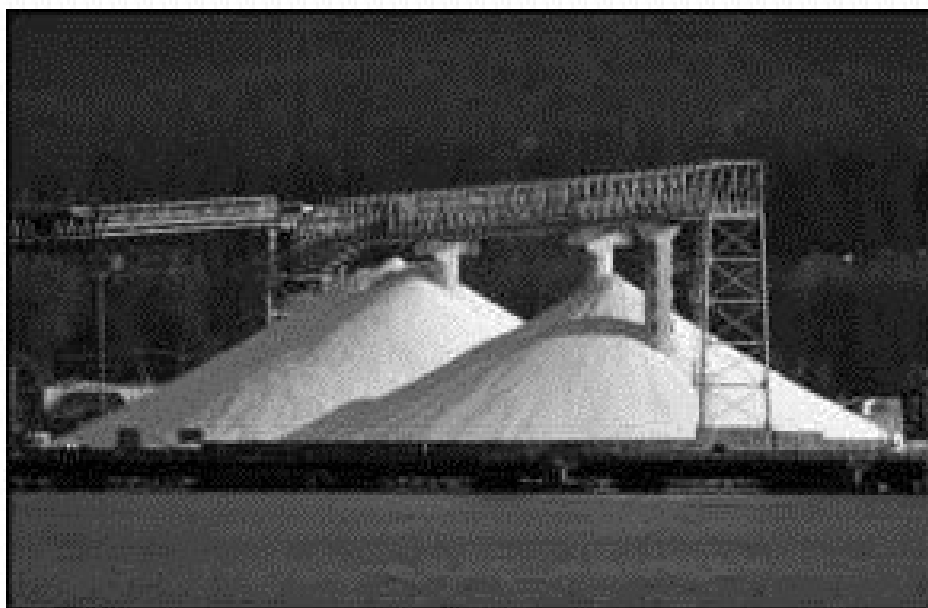


Рисунок 1.3 - Огромные запасы серы на нефтеперерабатывающем заводе Нижнекамске.

По оценкам, ежегодно производится более 60 миллионов тонн серы. Как следствие этого, а также в результате уникальных свойств серы, уже давно существует желание использовать серу энергоэффективными и экологически чистыми способами. Таким образом, сера стала основным активом в современной химии полимеров и материаловедении, а также стала центром исследований альтернативных источников энергии.

В 1953г было предложено применение серы в составе спеченных композиционных материалов, идея заключалась в пропитке пористого композиционного материала из железного порошка методом погружения в расплавленную серу.

В 1960 г. в состав композиционного материала вводили сульфиды металлов [48,49].

Изначально серу в качестве твердой смазки применяли путем пропитки пор композиционного материала при температуре 150°C , затем отжигали при температуре примерно 400°C , при такой высокой температуре образовались сульфиды а излишки серы выгорали. Однако очень сильно снижалась прочность это связано с тем, что в порах поступает большое количество серы и образовывается большое количество сульфидных включений. Известно,

что уменьшение плотности материала приводит к снижению прочности, например, объем элементарной ячейки чистого железа, составляет $23,54 \text{ \AA}$ (куб.), а сульфида железа $71,2 \text{ \AA}$, как видно плотность значительно снижается.

Учитывая этот недостаток можно сказать, что эффективным будет вводить серу в порошкообразном виде в исходный порошок композиционного материала, благодаря чему появится возможность равномерно распределить серу по всему объему материала [48,49].

При таком методе введения серы в состав необходимо перемешивать для активации поверхности, после активации сера будет притягиваться к поверхности частиц металла или графита и обволакивать. Во время спекания на поверхности металлов образуются сульфидные соединения.

Антифрикционные материалы на основе железного графита, с содержанием 25...30% серы способны сохранять свою работоспособность при нагрузках до 2 МПа при скоростях трения 1,0...3,0 м/с. В узлах трения скольжения с такими условиями они полностью способны заменить подшипниковые материалы бронзы и баббита, что приводит к значительной экономии.

Применение серы в качестве твердой смазки эффективно не только с материалами на железной основе, но и с алюминием и медью получается хороший результат.

Алюминиевый композиционный материал с вкраплениями неметаллических частиц является перспективным заменителем медных и железных сплавов. Твердыми смазками в этих материалах являются сульфиды различных металлов. Сульфиды способны образовывать на поверхностях трения смазочную пленку, который снижает коэффициент трения между трущимися поверхностями, и предотвращают схватывание в экстремальных условиях [62].

Сера и некоторые ее соединения в виде сульфидов и дисульфидов позволяют в значительной степени положительно влиять на антифрикционные свойства материалов. Особенно в условиях повышенных

температур и нагрузок сера, присутствуя в зоне контакта трущихся поверхностей, способна предотвратить схватывание и снизить износ [63].

Антифрикционные свойства серы хорошо заметно на антифрикционных материалах на основе нержавеющей стали, обладающих низким коэффициентом трения. При этом получается высокая несущая способность – до 5 МПа [63].

А также наблюдаются положительные влияния серы с графитом на антифрикционные свойства, что привело к широкому их совместному применению. Композиционные материалы, содержащие серу и графит в составе одновременно, имеют коэффициент трения на много ниже чем применения их порознь. Материалы, имеющие в составе соединения графита с серой являются самосмазываемыми.

1.4 Самосмазывающие материалы, покрытия и их свойства

В настоящее время существует проблема увеличения ресурса работы антифрикционных самосмазывающих подшипников скольжения и других деталей, устанавливаемых в высокоскоростных узлах трения технологического оборудования.

В качестве самосмазывающихся материалов в основном используют материалы с содержанием графита, дисульфида молибдена, фторопласти.

Известны многие самосмазывающие материалы, но не все из них удовлетворяют современным требованиям, в основном с экономической и экологической точки зрения. Бывают материалы с низким коэффициентом, но с малой прочностью, с высокими прочностными характеристиками, но с высоким коэффициентом трения. Задачи современных ученых снизить коэффициент трения и повысить прочность.

Например, известен состав [38], который относится к твердым антифрикционным самосмазывающим материалам и может быть использован в средненагруженных узлах трения скольжения различных

областей техники, а также в качестве твердой смазки в тяжело нагруженных узлах трения.

Материал состоит из следующих компонентов, масс. %: кокс 15-25, медь 12-18, свинцово – бромсодержащее стекло 2-5, эпоксидная смола 7-13, графит остальное. Полученная прессованием под давлением 150 МПа и спеканием 190 - 220°C в течении 3 часов.

Коэффициент трения составляет 0,056, интенсивность изнашивания 0,5 мм/м, нагрузочная способность 3 МПа. характеристики данного материала не оставляют положительного мнения о применении в качестве подшипников скольжения т.к. они не велики.

В патенте [39] приведен материал относящийся к области триботехнической материаловедения и смазке твердых тел, в частности к узлам, деталям машин и механизмов, работающих в условиях сухого, граничного и жидкостного трения, предназначенных для торцевых уплотнительных колец, подшипников скольжения и порошковым втулок тормозной рычажной передачи для локомотивов, вагонов, цистерн подвижного состава железных дорог и метрополитена. В данной работе рассматривается его применение в качестве антифрикционного порошкового материала, обладающего свойствами, содержащего минимум или не содержащего порошков, дефицитных, токсичных компонентов, не загрязняющих окружающую среду и не опасных для здоровья населения. Для создания антифрикционного порошкового материала в этом случае достигали выбором соотношения таких компонентов, как медь, углерод, никель, сера, при следующих соотношениях компонентов, масс. %: медь 0,3-3,0, углерод 0,04-3,0, никель 0,1-3,0, сера 0,5-2,0, железо остальное. Наиболее лучшие результаты достигли, дополнительным содержанием порошка молибдена или дисульфид молибдена в количестве 0,07 – 5,0 масс. %. По словам авторов, указанные ингредиенты обеспечивают стабильные прочностные характеристики, износостойкость, малый коэффициент трения, отсутствие задигов и схватывание с материалом контртела в условиях

граничной смазки или в отсутствие, как в производстве, так и в условиях эксплуатации. Основам материала было железо, и в дополнении также содержит медь, углерод, никель, сера. Получали материал прессованием при температуре окружающей среды и давлении 400 – 700 МПа, затем брикеты загружали в печь с защитной атмосферой и температурой 1000 – 1200 °С.

Характеристики данного материала следующие: твердость не менее 90 НВ, пористость не более 20%, при микроструктуре – перлит, сульфиды, графит и поры. По словам авторов, материал сможет работать условиях самосмазывания при удельной нагрузке 25000 – 100000 МПа, скорости скольжения от 0,01 – 4,0 м/сек, знакопеременной нагрузки 25000 – 1000000 МПа при скорости скольжения 0,02 м/сек. При этом коэффициент трения не превышает 0,03. Использование втулок из порошка снижает уровень шума, возможность схватывания материалов пары трения и обеспечивает надежность и долговечность состава в широком диапазоне нагрузок и скоростей. Материал, безусловно, имеет хорошие характеристики, но условия изготовления сложны и неприменимы для сельскохозяйственных машин.

Таким образом, в настоящее время разработаны большое количество антифрикционных материалов и покрытий направленные по расширению области применения полимеров в качестве подшипников скольжения. Эти работы показывают, что существенное улучшение физико-механических полимеров можно достичь путем стабилизации структур, введением наполнителей, стабилизаторов, армированием волокнистыми материалами, применением тонкослойных вкладышей или толстостенных покрытий.

Повышение нагрузочной способности и долговечности подшипников скольжения за счет улучшения прочностных и фрикционных свойств полимеров далеко не исчерпало себя и дальнейшие исследования в этом направлении таит в себе большие возможности, способные повысить качество, долговечность, надежность подшипников скольжения из полимеров. Вместе с этим не менее важное направление имеет повышение

работоспособности и долговечности подшипников скольжения из полимеров за счет отыскания оптимальных конструкций трущихся узлов.

Многие известные подшипники скольжения из полимерных материалов решая отдельные технические задачи, не сочетают в себе многих свойств, которыми должны удовлетворять подшипниковые узлы, в частности, например, известные конструкции, обладают низким теплоотводом, недостаточной герметичностью, быстрым износом. Так, например толстостенные подшипники скольжения из полимеров хорошо противостоят абразивному износу, поглощая абразивные частицы, обладают демпфирующими свойствами, не требовательны к точности обработки и монтажа т.к. компенсирует неточности размеров за счет упругих свойств полимера. Но наряду с этими достоинствами есть, и недостатки они значительно превышают тепловую напряженность работы сопряжения, за счет недостаточной теплопроводности, что приводит к повышению рабочих температур, а, следовательно, к увеличению коэффициента трения и износа.

Тонкостенные подшипники значительно лучше отводят тепло и не имеют многих из указанных выше недостатков. Однако, положительные свойства толстостенных подшипников очень важные для большинства сельскохозяйственных машин с уменьшением толщины слоя значительно снижаются. Поэтому основным недостатком в существующей тенденции создания подшипников скольжения является отсутствие широкого использования специфических свойств полимерных материалов.

1.5 Основные выводы, цели и задачи исследования

Исходя из приведенного обзора и анализа результатов, экспериментальных и теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. При обзоре существующих подшипников скольжения пришли к выводу что, в сельскохозяйственных машинах, работающих в условиях

абразивной и коррозионной среды целесообразно применять самосмазывающие подшипники скольжения на основе полимерных композиционных материалов.

2. Известные композиционные материалы, применяемые в подшипниках скольжения, имеют недостаточную теплопроводность и термостойкость, ограничения в использовании вследствие пониженных прочностных характеристик.

3. Известные технологии и способы изготовления подшипников скольжения в ряде случаев трудоемки и сложны в изготовлении, либо имеют определенный предел в своем использовании.

4. Результаты некоторых исследований показывают что, применение серы и его соединений в материалах подшипников скольжения положительно сказываются на антифрикционных свойствах.

5. Существуют способы получения антифрикционных материалов с использованием серы в составе в качестве сульфидов, но не имеется материала серным связующим, который способен образовывать сульфиды в процессе трения.

6. Некоторые исследования доказывают возможность применения серы в качестве связующего.

Исходя из выше изложенного, целью настоящей работы является получение композиционных материалов, повышения долговечности узла трения скольжения с применением подшипников скольжения из композиционного материала.

Исходя из указанной цели исследования, его основными задачами являются

1. На основании анализа физико-механических свойств и требований для материалов используемых в подшипниках скольжения выделить группу свойств определяющих их надежность.

2. Разработать материал подшипника скольжения, обладающего достаточной для рассматриваемых узлов трения работоспособностью в условиях повышенных нагрузок, скоростей скольжения и абразивной среды;

3. Исследовать возможность повышения физико-механических свойств композиционных материалов технологическими мероприятиями;

4. На основе экспериментальных исследований выявить закономерность трения и изнашивание материалов в паре со сталью;

5. Разработать технологию изготовления подшипников скольжения из композиционных материалов и провести оценку технико-экономической эффективности.

5. Разработать технологический процесс изготовления подшипников скольжения из серографитовых композиционных материалов и провести оценку технико-экономической эффективности.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Обоснование состава антифрикционного композиционного материала для подшипников скольжения

Использование дисперсных материалов в качестве наполнителей позволяет получать новые композиционные материалы на основе полимеров. Основные принципы создания таких материалов обусловлены как специфическими свойствами самих дисперсий металлов, так и особенностями взаимодействия между частицами металла и полимерной матрицей в процессе формирования материала и его эксплуатации.

Проблема конструирования композиционного полимерного материала является чрезвычайно важной и достаточно сложной. Однако в настоящее время практически отсутствуют количественные критерии и теоретические разработки, позволяющие научно обосновать требования к связующему и наполнителю. Но, даже зная физические характеристики полимерного связующего и наполнителя, пока еще нельзя с достаточной точностью предсказать свойства композиционного материала заданного состава и конструкции. Достаточно сказать, что до сих пор нет аналитических зависимостей, описывающих влияние размеров, формы и природы частиц порошкообразного или волокнистого наполнителя на свойства наполненного материала.

Важной проблемой является также стабилизация свойств композиционных материалов в условиях хранения, переработки и эксплуатации. Решение этой проблемы должно охватывать три основных аспекта: обеспечение стабильности химического строения и физической структуры полимерного компонента; обеспечение стабильности не полимерного компонента, обеспечение стабильной связи между связующим и наполнителем.

Возможности варьирования химического состава связующего и наполнителей, а также физической структуры композиционного полимерного материала открывают широкие перспективы конструирования и создания новых материалов с самыми различными свойствами.

Физико-механические свойства наполненных материалов в первую очередь определяются их структурой, элементами которой являются дисперсионная среда (полимерное связующее), дисперсная фаза (наполнители) и межфазная область. Разрушение наполненных материалов обычно происходит по межфазным границам, так как слабым звеном наполненных систем в большинстве случаев является граница полимер — наполнитель. В связи с этим одним из основных условий получения высокопрочного материала является обеспечение высокой прочности адгезионной связи на границе раздела фаз при отсутствии внутренних напряжений. Это может быть достигнуто только при условии хорошего смачивания связующим поверхности наполнителя и при определенном соотношении между модулями упругости наполнителя и связующего.

Смачиваемость поверхности наполнителя полимером определяет характер распределения макромолекул на поверхности и плотность их упаковки в поверхностном слое. При этом наличие поверхности раздела и адсорбционное взаимодействие между полимером и наполнителем приводят к изменению молекулярной подвижности цепей в граничном слое, изменению их конформаций. Очевидно, наилучшее смачивание будет при сильном адсорбционном взаимодействии полимера и поверхности.

Композиционные материалы на основе полимеров и металлов широко применяются для изготовления различных узлов трения. Поэтому далее основное внимание уделяется вопросам создания самосмазывающихся композиций антифрикционного назначения.

Характерной особенностью таких материалов является то, что в них в качестве наполнителей наряду с металлами часто используют различные вещества органического и неорганического происхождения, обеспечивающие

армирующие, усиливающие, самосмазывающие и другие эффекты. Это обуславливает необходимость рассмотрения специфических особенностей взаимодействия таких наполнителей с полимерной матрицей.

В композиционных самосмазывающихся материалах типом связующего определяется метод закрепления частиц твердой смазки в блоке детали. Кроме того, связующее предотвращает удаление частиц твердой смазки с трущихся поверхностей при их относительном перемещении, способствует более эффективному распределению наполнителя на поверхности и по всему объему композиционного материала.

В качестве связующего при создании антифрикционных материалов следует применить полимерную серу, т.к. присутствие серы в зоне контакта трущихся поверхностей в значительной степени снижает износ и предотвращает схватывание. Подобно графиту сера и сернистые соединения позволяют устранить заедание, уменьшить склонность к наволакиванию, особенно в условиях температур и нагрузок [48].

Сера относится к числу элементов, обладающих высокой химической активностью. Это – металлоид с низкой удельной массой и температурами плавления 112-118 °С и кипения 444,6 °С который реагирует со всеми металлами с образованием сульфидов.

В качестве наполнителей при создании композиционных материалов используют твердые, жидкие и газообразные вещества органического и неорганического происхождения. Наиболее распространенные наполнители – твердые, представляющие собой высокодисперсные порошки, волокна, зерна различной формы, листы и др.

В зависимости от характера взаимодействия с полимером наполнители условно подразделяют на инертные и активные, или упрочняющие. Наполнители должны совмещаться с полимером или диспергироваться в нем с образованием однородной композиции, должны хорошо смачиваться расплавом или раствором полимера, их свойства при хранении, переработке и эксплуатации должны быть стабильными.

В качестве наполнителей полимеров часто используют непрерывные или рубленые органические и неорганические волокна. Из органических волокон наиболее широко применяют хлопок в виде текстильных отходов, джут, лен. Все большее применение находят синтетические волокна, такие как полиамидные, полиэфирные и др. Пластмассы, содержащие такие волокна, характеризуются высокой коррозионной и химической стойкостью, малым коэффициентом трения и высокой износостойкостью, однако обладают низкой теплостойкостью.

В зависимости от соотношения показателей механических свойств полимера и наполнителя, размеров волокон, а также характера взаимодействия на поверхности раздела полимерная матрица — волокно последнее может проявлять свойства как обычных дисперсных, так и армирующих наполнителей, упрочняющее действие которых весьма значительно. Содержание волокнистых наполнителей в термопластах составляет обычно 15-40%, а в реактопластах — 30-80% от массы полимерного материала.

В особую группу могут быть выделены наполнители, используемые при создании самосмазывающихся материалов на основе полимеров. Для таких материалов широкое применение в качестве наполнителей получили твердые смазки, имеющие ламинарную структуру графит, MoS_2 , $MoSe_2$, BN, CdO , CaF_2 и др. Несмотря на такое большое разнообразие твердых слоистых смазок и их широкое применение, пока еще нет четкой теории, определяющей смазывающие способности той или иной смазки.

Слоистые твердые смазки относятся к классу соединений, которые имеют различную прочность атомных связей в различных направлениях. Это, прежде всего, связано с различием в межатомных расстояниях в слоях и между слоями. Немаловажное значение при этом имеют многочисленные дислокации на основных плоскостях кристалла.

При воздействии внешних сил происходит скольжение плоскостей в направлении, нормальном к действию наиболее слабых сил. Однако малое

сопротивление сдвигу в одной кристаллографической плоскости не является достаточным критерием для оценки смазывающей способности твердых смазок. Необходима еще высокая адгезия к сопряженной металлической поверхности. У сульфидов и селенидов такую прочную связь с трущейся металлической поверхностью обеспечивают атомы серы и селена, расположенные в плоскости скольжения. Достаточное адгезионное взаимодействие графита с металлом может быть реализовано только при наличии на частицах графита хемосорбированных или адсорбированных молекул и прежде всего воды. Одновременно с этим в присутствии паров воды сопротивление графита сдвигу по плоскостям спайности значительно уменьшается за счет адсорбции молекул воды на основных кристаллографических плоскостях. В результате этого создаются условия, при которых сопротивление сдвигу внутри решетки кристаллитов становится значительно меньше адгезии графита к поверхности металла, что и обеспечивает эффективное смазывание.

Коэффициент трения и износостойкость твердых слоистых смазок в значительной степени зависят от внешних условий – скорости скольжения, нагрузки, продолжительности неподвижного контакта и ряда других факторов. Однако для различных смазок эта зависимость проявляется в различной степени.

При разработке композиционных самосмазывающихся материалов необходимо учитывать специфику поведения тех или иных наполнителей в конкретных условиях эксплуатации. Например, при повышении температуры в зоне трения происходит окисление дисульфида молибдена с образованием триоксида молибдена, что приводит к увеличению коэффициента трения и износа композиций.

Графит и графитовые материалы обладают хорошей теплопроводностью, обеспечивают хороший отвод тепла из зоны трения в результате чего температура в зоне контакта обычно не превышает 373 К, и

соответственно коэффициент трения их мало зависит от скорости скольжения.

Анализируя свойства различных связующих и наполнителей можно сделать вывод, что для антифрикционного композиционного материала связующим должна являться полимерная сера, наполнителем в первом случае графит и медь, во втором случае графит и алюминий, в третьем случае графит и оксид железа, в четвертом случае графит и древесный порошок. Порошки цветных металлов необходимы для лучшего отвода тепла и упрочнения смазочной пленки на поверхности трения, древесная мука для сохранения баланса расплавления серы.

Способность реагирования связующего с наполнителями обосновывается термодинамическими расчетами.

2.2 Расчет характеристик подшипников скольжения по заданным физико-механическим свойствам поверхности трения

Целью расчета подшипника сухого трения является установление допустимых значений действующей нагрузки, скорости скольжения, температуры и других параметров и их соответствия физико-механическим свойствам выбранных материалов пары трения втулка - вал при принятых геометрических соотношениях, обеспечивающих наибольший срок службы и достаточно высокие антифрикционные свойства. Речь идет о том, чтобы в отсутствии смазывающего материала на трущейся поверхности получить наибольшую износостойкость подшипника и обеспечить минимальное изменение его геометрических размеров во времени с учетом действующих условий эксплуатации.

При конструктивной разработке машины или агрегата производится расчет динамической системы вала, в результате которого определяются нагрузка, действующая на подшипник (реакция в опоре), N (Н), диаметр шейки вала d (м) и частота вращения вала n (мин^{-1}). Кроме этих величин

известными являются окружающая среда и ее свойства (коррозионная активность, наличие абразивных взвесей и их размеры, вязкость, радиоактивное воздействие и др.), температура окружающей среды, вид нагрузки (спокойная, ударная, вибрационная и т. п.).

Используя имеющиеся данные, а также известные физико-механические свойства материалов, которые могут применяться для подшипников сухого трения, производят предварительный выбор материала подшипника.

При выборе материалов для подшипников сухого трения основное значение имеет их износостойкость, а следовательно, срок службы. Износ опорных поверхностей подшипников сверх допустимой величины нарушает точность взаимного расположения вала с рабочими органами и корпуса, приводит к его динамической неустойчивости и вибрации, возможности разрушения подшипника на ходу. Износ увеличивается с повышением давления (контактных напряжений), а коэффициент трения снижается либо остается постоянным до критического значения, соответствующего катастрофическому износу. Физико-механические свойства материала подшипника должны обеспечивать наиболее высокую износостойкость и упругий контакт при трении, минимальный коэффициент трения, отсутствие склонности к задиру, хорошую прирабатываемость. Кроме этого, материал должен обладать достаточной механической прочностью, технологичностью и стойкостью к воздействию окружающей среды.

Величина предельно допустимой температуры для выбираемого материала, при которой происходит его разрушение либо резкое падение механических характеристик, должна быть больше температуры окружающей среды не менее чем на $50 - 80^{\circ}\text{C}$. Характер динамической нагрузки должен соответствовать прочностным свойствам выбранного материала. Не допускается применение хрупких материалов, имеющих низкую ударную вязкость (менее $0,5 \text{ МПа}$) при ударных и вибрационных

нагрузках. Применение материала должно быть экономически обосновано как в процессе изготовления, в период эксплуатации.

Материал подшипника должен быть малодефектным, а его технологическая обработка проста и доступна.

Исходя из вышесказанного, подбирается серографитовый композиционный материал возможность получения которого обоснованы термодинамическими расчетами, возможность применения тремя критериями:

- прочности,
- износостойкости,
- теплостойкости,

После выбора материала определяют геометрические размеры подшипника: длину подшипника l , толщину стенки подшипника δ и особенности его конструктивного устройства (вид крепления втулки, установку в металлическую обойму, фаски и т. д.).

Длину подшипника вычисляют по формуле

$$l = \frac{\pi N n}{600 \rho \omega} \quad (2.1)$$

Полученные значения длины подшипника сопоставляют со стандартными размерами.

2.2.1 Расчет теоретического срока службы

Расчет теоретического расчетного срока службы основан на большом количестве лабораторных испытаний и учитывает определенные эксплуатационные данные.

Номинальный срок службы определяется как количество циклов движения или часов работы, которое может быть достигнуто большинством достаточно большого числа подшипников скольжения при одинаковых условиях эксплуатации до выполнения определенных критериев отказа.

Величина износа и увеличение трения зависят от поверхности контакта скольжения и области применения. Под одинаковым таким образом, условия эксплуатации, достигнутый срок службы могут существенно отличаться.

Расчет теоретического номинального ресурса дает сравнительные значения для подшипников. Он дает информацию о более высокой или более низкой производительности выбранным подшипников.

Критерии отказа в подшипниках скольжения износ происходит в результате твердого тела и смешанных условий трения. Критериями отказа являются предельные значения испытаний, связанные с величиной износа.

Износ зоны нагрузки как критерий отказа.

Расчет базового номинального срока службы применяется к подшипникам скольжения, которые выполняют вращательное, поворотное или линейное движение.

Значимыми факторами для длительного срока службы являются значение FV и конструкция сопрягаемой поверхности. В случае композитных подшипников скольжения, а также втулок особое внимание должно быть уделено материалу, глубине шероховатости и структуре поверхности сопрягаемой поверхности. В случае сферических подшипников скольжения оптимальная сопрягаемая поверхность обеспечивается внутренней кольцом.

Температура окружающей среды, тепловыделение через вал, подшипник и корпус, а также продолжительность работы оказывают фундаментальное влияние на рабочую температуру и, следовательно, на номинальный срок службы. Экстраординарные факторы. Следующие параметры не учитываются при расчете номинального срока службы и могут при определенных обстоятельствах оказывать очень значительное влияние на срок эксплуатации:

- коррозия;
- старение с мазочного материала;
- загрязнение;
- влажность;

■ вибрации;

■ амортизаторы.

Срок службы - это срок службы, фактически достигаемый подшипником скольжения.

Он может отклоняться от расчетного срока службы эксплуатации. Базовый срок службы эксплуатации из-за большого количества воздействий расчетный базовый срок службы эксплуатации является направляющей величиной. Поэтому в случае подшипников скольжения эти значения могут быть чрезмерно высокими при очень низких нагрузках на подшипники или очень низких скоростях скольжения.

Теоретические расчеты номинального срока службы актуальны только для изделий, представленных в данной работе.

Теоретические расчеты номинального срока службы ни при каких обстоятельствах не могут быть перенесены на другие изделия.

В случае упорных шайб расчет номинального срока службы допустим только в том случае, если подшипник постоянно работает без зазора, а сопрягаемая поверхность по меньшей мере так же велика, как и упорная шайба.

Номинальный срок службы необслуживаемых и малообслуживаемых подшипников

$$L_h = \frac{K_1}{p \cdot v} \cdot f_d \cdot f_v \cdot f_{pv} \cdot f_{pv2} \cdot f_a \cdot f_R \cdot f_W \cdot f_A \cdot f_B \cdot f_L \cdot f_{\alpha} \cdot f_{\beta} \cdot f_{H2} \quad (2.2)$$

Подшипники скольжения

■ Для этой цели используются другие поправочные коэффициенты, на аналогичной основе

■ Нижеследующее относится только к конкретному продукту, скорректированному методу расчета номинального срока службы для необслуживаемых и малообслуживаемых композитных подшипников скольжения.

Вращательное и поворотное движение:

$$L_h = \frac{1000}{pv} \cdot f_p \cdot f_v \cdot f_{pv} \cdot f_\theta \cdot f_R \cdot f_W \cdot f_A \quad (2.3)$$

Линейное движение:

$$L_h = \frac{1000}{pv} \cdot f_p \cdot f_v \cdot f_{pv} \cdot f_\theta \cdot f_R \cdot f_W \cdot f_A \cdot f_L \quad (2.4)$$

Вращательное и поворотное движение:

$$L_h = \frac{2500}{pv} \cdot f_p \cdot f_v \cdot f_{pv} \cdot f_\theta \cdot f_R \cdot f_A \quad (2.5)$$

Преобразование номинального ресурса от часов работы до оборотов:

$$L_{calc} = L_h \cdot f \cdot 60 \quad (2.6)$$

L_h - Номинальный срок службы подшипника скольжения;

L_{calc} - Номинальный срок службы в колебаниях;

K_L - Удельный коэффициент подшипника скольжения, N/mm^2 ;

P - Удельная нагрузка, для расчета N/mm^2 ;

v - Скорость скольжения, для расчета m/s ;

C_r - Базовая номинальная радиальная нагрузка, N ;

C_a - Базовая номинальная осевая нагрузка, см. таблицы размеров;

f - Частота вращения, min^{-1} ;

f_p - Поправочный коэффициент для нагрузки;

f_v - Поправочный коэффициент для скорости скольжения;

f_{pv} - Поправочный коэффициент для энергии трения;

f_θ - Поправочный коэффициент для температуры;

f_R - Поправочный коэффициент для глубины шероховатости;

f_W - Поправочный коэффициент для материала;

f_A - Поправочный коэффициент для условия вращения;

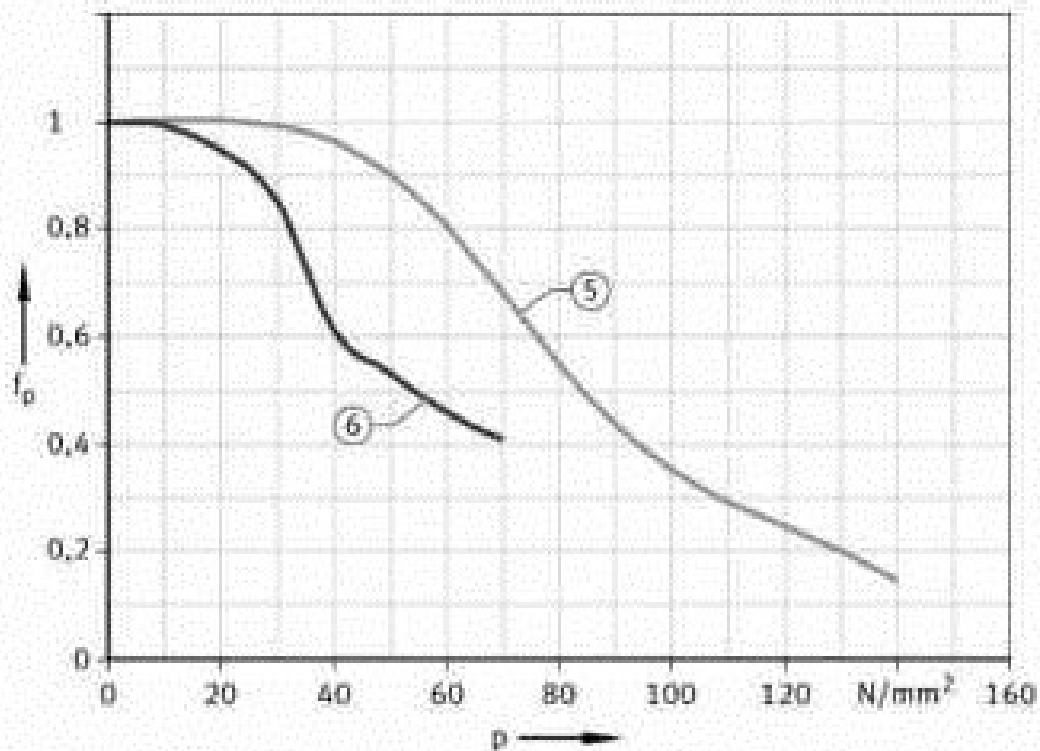
f_L - Поправочный коэффициент для линейного движения.

Расчет базового срока службы эксплуатации требует многочисленных корректирующих коэффициентов. Они учитывают влияние типа нагрузки, удельной нагрузки на подшипник, используемого материала, скорости

скольжения, температуры и глубины шероховатости сопрягаемой поверхности.

Значения поправочных коэффициентов для нагрузки f_p , скорости скольжения f_v , энергии трения f_{pt} , температуры f_t и глубины шероховатости f_R можно получить из диаграмм рисунок 2.1.

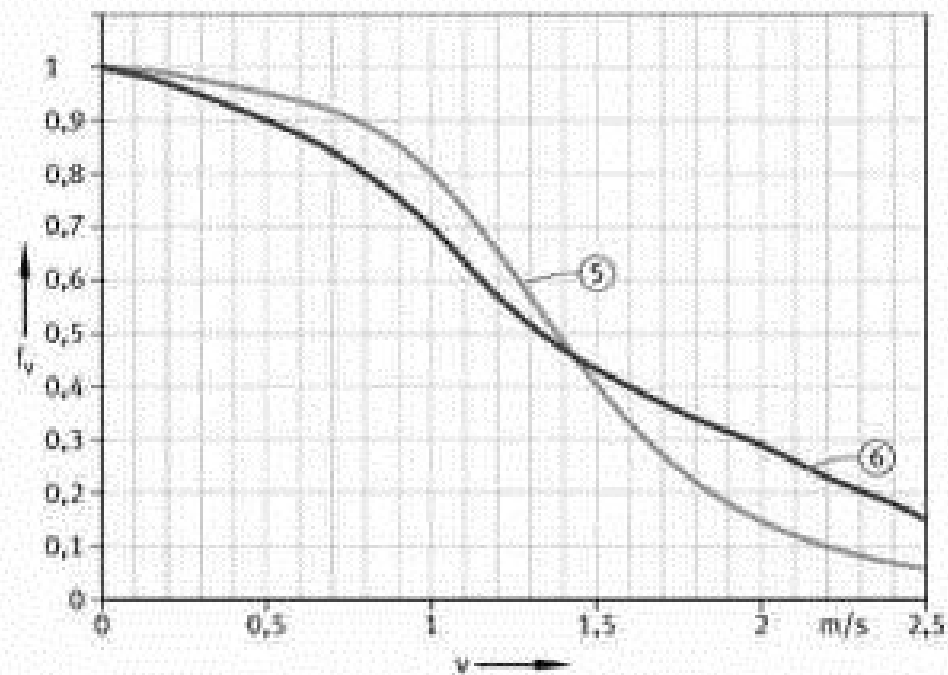
В графиках цифра 5 без применения композиционного материала, 6 с применением композиционного материала.



P - удельная нагрузки на подшипник;

f_p = поправочный коэффициент

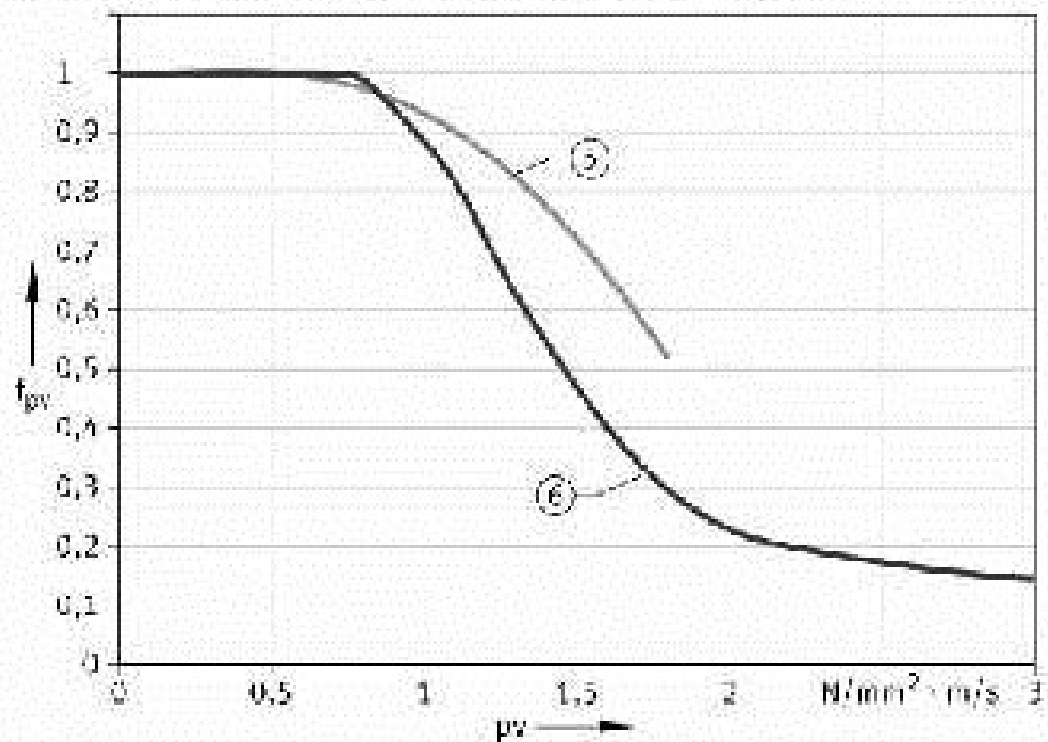
Рисунок 2.1 - Поправочный коэффициент для нагрузки



v - скорость скольжения,

f_v = поправочный коэффициент.

Рисунок 2.2 - Поправочный коэффициент для нагрузки



pv = произведение нагрузки на подшипник и скорости,

f_{pv} = поправочный коэффициент

Рисунок 2.3 - Поправочный коэффициент для энергии трения

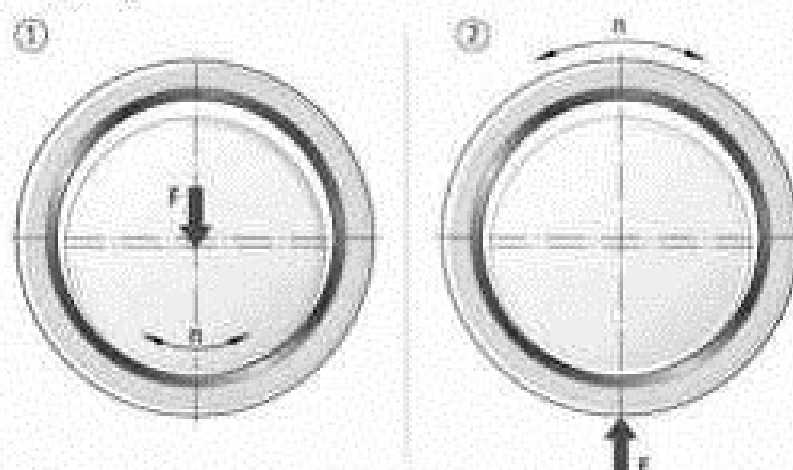
Поправочные коэффициенты выбираются в зависимости от скользящего слоя или поверхности контакта скольжения и применяются в соответствующем уравнении номинального ресурса.

Поправочный коэффициент f_L необходим в случае линейного движения с втулками со скользящим слоем.

■ простые втулки, упорные шайбы

- точечная нагрузка $f_A = 1$ (вращающийся вал, неподвижная втулка);
- окружная нагрузка $f_A = 2$ (неподвижный вал, вращающаяся втулка);
- упорная шайба $f_A = 1$;
- линейные альфа = 1;

Поправочный коэффициент f_A зависит от типа подшипника и типа нагрузки, рисунок 2.4:



F = нагрузка;

n = скорость.

Рисунок 2.4 - Поправочный коэффициент для условия вращения

Поправочный коэффициент f_w зависит от материала сопрягаемой поверхности с глубиной шероховатости $Rz\ 2$ - $Rz\ 3$.

$$f_L = 0,65 \cdot \frac{B}{H + B} \quad (2.7)$$

H_{max} - максимальная длина хода;

B - ширина втулки.

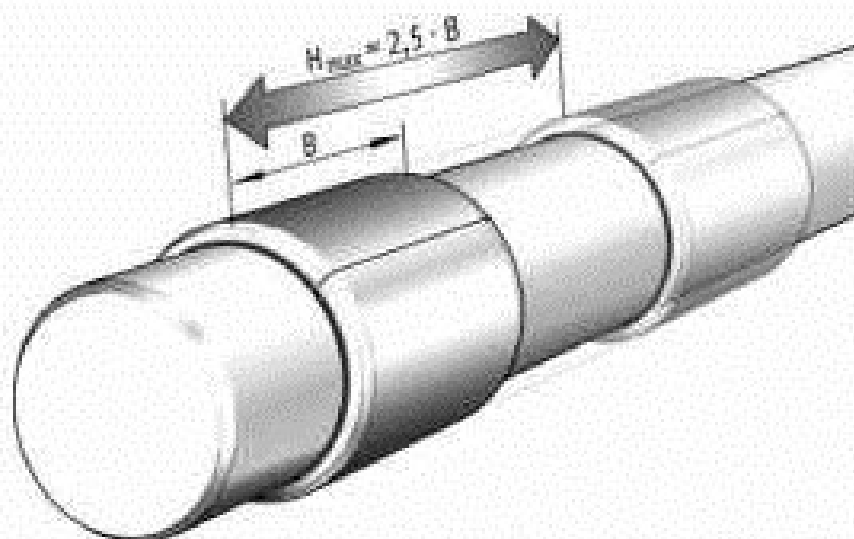


Рисунок 2.5- Максимальная длина хода при линейном движении

Номинальный срок службы подшипниковой втулки рассчитывается на основе скользящего слоя из композиционного материала. Для подшипниковых втулок номинальный срок службы должен быть проверен как для радиальной поверхности скольжения, так и для осевой поверхности скольжения подшипника.

Приведенные данные для расчета срока службы эксплуатации следующие:

- подшипниковый узел вала,
- вал и осевая рабочая поверхность корпуса (нелегированная сталь, глубина шероховатости $R_z 2$);
- точечная нагрузка (вращающийся вал, неподвижная втулка).

Номинальный срок службы втулки рассчитывается на основе скользящего слоя из композиционного материала. Несущая способность и срок службы для подшипниковых втулок номинальный срок службы должен быть проверен как для радиальной поверхности скольжения, так и для осевой поверхности скольжения подшипника.

Приведенные данные для расчета срока службы эксплуатации следующие:

- подшипниковое устройство вала;

■ вал и осевая рабочая поверхность основания (нелегированная сталь, глубина шероховатости $Rz \ 2$);

■ точечная нагрузка (вращающийся вал, неподвижная втулка).

Необходимый подшипник с требуемым номинальным сроком службы $L_n \geq 500$ ч.

Проверка допустимых нагрузок Для подшипниковых втулок расчетный ресурс должен быть проверен как для радиальной поверхности скольжения, так и для осевой поверхности скольжения (подшипника).

Необходимо проверить правильность допустимых нагрузок и скоростей скольжения, поскольку расчет полезного номинального ресурса возможен только в этом диапазоне.

Нагрузка на подшипник $F_r = 14000$ Н;

$F_a = 3000$ Н;

Рабочая скорость $n = 25$ мин⁻¹;

Рабочая температура $T = +35$ °С;

Базовая номинальная динамическая нагрузка $C_r = 92400$ Н;

$C_a = 35200$ Н;

Внутренний диаметр $D_i = 30$ мм;

Наружный диаметр фланца $D_n = 42$ мм;

Скользящий материал серографитовый композиционный материал.

2.2.2 Расчет грузоподъемности подшипника

Удельная нагрузка на подшипник должна быть рассчитана с помощью параметра удельной нагрузки K и проверена на достоверность.

Радиальная составляющая фланцевых втулок:

$$p = K \cdot \frac{F_r}{C_r} \quad (2.8)$$

$$p = 140 \cdot \frac{14000}{92400} = 21,21 \text{ Н/мм}^2$$

Осевая составляющая фланцевых втулок

$$p = K \cdot \frac{F_a}{C_a} \quad (2.9)$$

$$p = 140 \cdot \frac{3000}{35200} = 11,93 \text{ N/mm}^2$$

Скорость скольжения должна быть рассчитана с помощью внутреннего диаметра D_i или диаметра фланца D_{fl} и проверена на достоверность.

Радиальная поверхность скольжения

$$v = \frac{D_i \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot 10^3} \quad (2.10)$$

$$v = \frac{30 \cdot \pi \cdot 25}{60 \cdot 10^3} = 3,9 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

Осевая поверхность скольжения

$$v = \frac{D_{fl} \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot 10^3} \quad (2.11)$$

$$v = \frac{42 \cdot \pi \cdot 25}{60 \cdot 10^3} = 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

Радиальная составляющая фланцевых втулок:

$$p_v = 21,21 \cdot 3,9 \cdot 10^{-2} = 0,83 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{m/s}$$

Осевая составляющая фланцевых втулок

$$p_v = 11,93 \cdot 5,5 \cdot 10^{-2} = 0,66 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{m/s}$$

Оценка уравнения ресурса после коррекции:

$$L_h = \frac{K_L}{p_v} \cdot f_p \cdot f_v \cdot f_{pv} \cdot f_a \cdot f_R \cdot f_W \cdot f_A \quad (2.12)$$

Расчетный срок службы радиальной поверхности скольжения рассчитывается следующим образом:

$$L_h = \frac{1000}{0,83} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,96 \cdot 1 \cdot 0,97 \cdot 0,5 \cdot 1 = 560 \text{ h}$$

Расчетный срок службы осевой поверхности скольжения рассчитывается следующим образом:

$$L_h = \frac{1000}{0,66} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,98 \cdot 1 \cdot 0,97 \cdot 0,5 \cdot 1 = 720 \text{ h}$$

Основной номинальный срок службы определяется радиальной поверхностью скольжения.

Таким образом, общий номинальный срок службы составляет 560 ч. Выбранная фланцевая втулка соответствует требуемому номинальному сроку службы L_h 500 ч.

2.2.3 Повышение температуры при трении

Момент трения подшипника M определяется следующим образом:

$$M = F \cdot \mu \cdot \frac{d_k}{2} \cdot \frac{1}{1000} \quad (2.13)$$

M - Момент трения подшипника Нм;

F_N - Концентрическая радиальная или осевая нагрузка;

μ - Коэффициент трения;

d_k - Определенный диаметра мм.

Тепловыделение.

Трение превращается в тепло. Адекватное тепловыделение необходимо для функционирования подшипника скольжения. Это происходит за счет конвекции через корпуса и валы в окружающую среду. В некоторых случаях тепло уносится с помощью смазки.

В подшипниках скольжения, где преобразуется высокая энергия трения P_M , требуется повышенное тепловыделение.

Проектирование подшипниковых узлов.

Валы втулок должны быть скошены, а все острые края закруглены.

Для облегчения вдавливания фаска должна быть выполнена до f_a $20^\circ \pm 5^\circ$.

Для отверстия корпуса рекомендуется глубина шероховатости Rz 10.

Оптимальный срок службы при сухом ходе скользящего слоя композиции достигается при глубине шероховатости вала от Rz 2 до Rz 3.

2.2.4 Расчет по критерию теплостойкости

Нормальный тепловой режим при установившейся работе подшипника обеспечивает стабильность физико-механических свойств материалов пары трения и геометрических размеров подшипника и является основным фактором надежности, долговечности и необходимого срока службы.

Для оценки температуры, возникающей в зоне контакта подшипника и цапфы вала использовалась методика, представленная в [60], согласно которой, выделяемая в процессе трения тепловая энергия находится по формуле:

$$Q_1 = \frac{l df}{427} p v, \quad (2.14)$$

Если учесть что коэффициент трения при установившемся движении величина постоянная выражение следует:

$$Q_1 = C p v, \quad (2.15)$$

$$\text{где} \quad C = \frac{l df}{427} = const, \quad (2.16)$$

Тепло, выделившееся в подшипнике без смазки отводиться во внешнюю среду через корпус, поэтому необходимо рассчитать отвод тепла через корпус, который рассчитывают по формуле:

$$Q_2 = k(t_f - t_a) F, \quad (2.17)$$

где k – коэффициент теплопередачи, $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; t_a – температура рабочей зоны подшипника, $^\circ\text{C}$; t_a – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$;

F – наружная теплоотдающая поверхность корпуса подшипника, м^2 .

Коэффициент теплопередачи можно найти по следующей формуле:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\delta_i}} + \frac{1}{\alpha_a}, \quad (2.18)$$

где δ_i – толщина слоя материала подшипника, м; λ – коэффициент теплопроводности слоя в $\text{Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$; α_a – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности подшипника в окружающую среду, $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

При установившемся режиме $Q_1 = Q_2$ и из формулы (2.14) и (2.17) температура в рабочей зоне подшипника будет

$$t_f = \frac{8,43ldf}{kF} pv + t_{\lambda}, \quad (2.19)$$

Температуру t_f сравнивают с предельно допустимой температурой $[t]$ для выбранного материала так, чтобы выдерживалось соотношение

$$t_f \leq [t] \quad (2.20)$$

2.3 Зазор подшипника и монтажные допуски

Теоретический зазор подшипника отклонения из композита

Теоретический зазор подшипника рассчитывается следующим образом:

$$\Delta S_{\max} = d_{G\max} - 2 \cdot S_{3\min} - d_{W\min} \quad (2.21)$$

$$\Delta S_{\min} = d_{G\min} - 2 \cdot S_{3\max} - d_{W\max} \quad (2.22)$$

$S_{\max}$ - Максимальный зазор подшипника, мм;

$S_{\min}$ - Минимальный зазор подшипника, мм;

$d_{G\max}$ - Максимальный диаметр отверстия корпуса, мм;

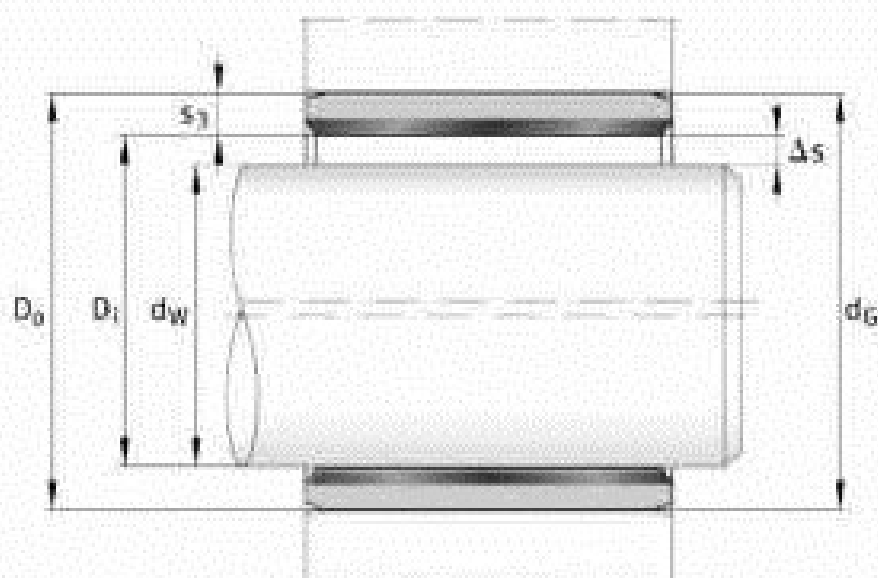
$d_{G\min}$ - Минимальный диаметр отверстия корпуса, мм;

$d_{W\max}$ - Максимальный диаметр вала, мм;

$d_{W\min}$ - Минимальный диаметр вала, мм;

$S_{3\max}$ - Максимальная толщина стенки максимум, мм;

$S_{3\min}$ - Минимальная толщина стенки, мм.



D_o - наружный диаметр втулки;

D_i - внутренний диаметр втулки;

d_w - диаметр вала;

d_G - диаметр отверстия корпуса;

s_1 - толщина стенки втулки;

s - зазор подшипника;

Рисунок 2.6 - Теоретический зазор подшипника после вдавливания

Теоретический зазор подшипника после вдавливания втулок или подшипниковых втулок метрических или дюймовых размеров рассчитывается без учета возможного расширения отверстия.

2.4 Выводы по разделу

Исходя из вышеперечисленных расчетов можно сделать вывод в том, что для изготовления подшипника скольжения необходимы следующие расчеты:

1. Произвести предварительный выбор материала подшипника исходя из коррозионных, абразивных и других свойств окружающей среды, ее температуры, характера динамической нагрузки;
2. Рассчитать характеристик подшипников скольжения по заданным физико-механическим свойствам поверхности трения;

3. Сделать расчет теоретического срока службы;
4. Вычислить грузоподъемность подшипника;
5. Подсчитать температуру подшипника по формуле и сравнить с предельно допускаемой температурой [1] для выбранного материала по выражению
6. Выбрать величину оптимального зазора в соединении.

3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью экспериментального подтверждения прогнозируемых теоретических исследований основных закономерностей изнашивания при трении необходимо разработать методику экспериментов, в котором будут определяться прочностные, температурные, износостойкие характеристики, которые требуются для обоснования эффективности создания серографитовых композиций и проверки, опытных образцов подшипников скольжения на работоспособность. При проведении исследований и сравнении результатов следует учесть, что антифрикционные свойства полимерных материалов в значительной мере изменяются от целого ряда конструктивных и технологических факторов и зависят от температурного и временного режима изготовления деталей, а также методов их испытания, монтажных посадок и т.п. в связи с этим, прежде чем приступить к исследованию, были рассмотрены некоторые общие вопросы методики проведения эксперимента, позволившие исключить влияние посторонних факторов на результаты исследования. Результаты экспериментальных исследований необходимо сопоставлялись с теоретическими результатами.

3.1 Методика формирования и получения лабораторных образцов композиционных материалов

Объектом исследования выбраны композиционные материалы на основе серного связующего. Как было показано раньше сера это вещество, которое хорошо взаимодействует с металлами и образует сульфиды, а сульфиды в свою очередь являются антифрикционными материалами. Подбор компонентов для антифрикционных материалов определялись методом термодинамического анализа. Более подходящие составы исследовались экспериментальным методом.

Основное требование к антифрикционным материалам это – способность образовывать на поверхности трения скольжения непрерывную пленку с низким коэффициентов трения и хорошими смазочными свойствами. Требование образования пленок со смазочными свойствами на поверхности трения антифрикционных материалов объясняется физико-химическими и механохимическими процессами, которые происходят в зоне контакта трения, свойств наполнителя и связующего, их процентным соотношением в композициях связующее – наполнитель и может быть классифицировано по схеме, предложенной И. В. Крательским, из которой видно, что положительный градиент по глубине может быть обеспечен в процессе контактного взаимодействия полимерного материала с контртелом, что свойственно, в частности, описанным ниже композиционным материалам, или путем предварительного нанесения антифрикционного покрытия на металлическую поверхность.

3.1.1 Материалы состава и их характеристики

Для получения серографитовых композиционных материалов использовали связующие и наполнители.

Применяемые компоненты и их характеристики представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные компоненты для получения серографитовых композиционных материалов

Наименование	Характеристика
Сера (S)– отход нефтеперерабатывающих заводов (ГОСТ 127-93)	Плотность 2,07 г/см ³ Светло-желтый порошок
Отход металлургического завода (окалина)	Содержание железа 50% Плотность: 2,7-3,8 г/см ³ Темно – серый порошок
Оксид железа(Fe ₂ O ₃)	Плотность 3,4-3,9 г/см ³ Красно – коричневый порошок
Графит чешуйчатый природный (C)	Плотность 2,2 г/см ³ Серый с металлическим блеском порошок

Алюминиевый порошок (Al)	Плотность 2,699 г/см ³ ТУ 48-5-226-87
Медный порошок марки ПМР-1	(ГОСТ 4960-75).
Древесная мука	ГОСТ 16361-87

Связующее: Сера побочный продукт Нижнекамского нефтеперерабатывающего завода Р.Т. (ГОСТ 127-93).

Сера, применяемая в качестве связующего вещества в композиционных материалах, имеет массовую долю основного вещества серы 99,98 %, золы (Fe, Mn, Cu) 0,013%, серную кислоту 0,001%, вода 0,1%, органических веществ 0,006%.

Наполнители: В качестве наполнителей были выбраны компоненты исходя из требований прочности, антифрикционных свойств материала, условий взаимодействия компонентов между собой согласно термодинамическому расчету, снижению коэффициента трения контактирующих деталей, повышения износостойкости, снижения износа основного материала (вала), повышения теплопроводности. Исследуемые материалы следующие: оксид железа, мелкодисперсный порошок красного цвета, отход металлургического завода, (окалина) порошок темно – серого цвета размером частиц 0,2-0,05 мм, графит чешуйчатый природный, древесный порошок размером 0,25 – 0,063 мм.

3.1.2 Методика получения образцов композиций

Изменения антифрикционных свойств композиционных материалов от способов их переработки и технологии производства, предъявляют повышенные требования к однородности качеств материала деталей, определяемых методами изготовления. Поэтому все образцы изготавливались из одной партии сырья на одинаковых условиях оборудования, согласно разработанной методике. Все это позволило получить детали с достаточно однородными физико-механическими свойствами.

Композиционные материалы изготавливались путём смешения различных компонентов с последующим прессованием и термообработкой. Приготавливались образцы ручным и механическим способом. Перед приготовлением исходные компоненты подвергались некоторым обработкам: высушивание, измельчение, тонкий помол на шаровой мельнице до тонины 0,2-0,05мм с последующим просеиванием.

Образцы готовились следующим образом: измельченная сера и наполнители перемешивались до однородной массы при комнатной температуре, насыпались в пресс-форму 10×60, подвергались прессованию 10-90 МПа, помещались в термошкаф, подвергались термообработке в течении 30-60 мин. при температуре 110-150°C, после термообработки прессовались в горячем виде под давлением 10-90 МПа и под прессом, остужались при комнатной температуре. Далее происходила выпрессовка полученного образца из формы, и производились исследования по контролю качества образцов, условия проведения контроля - комнатная температура 20-35°C.

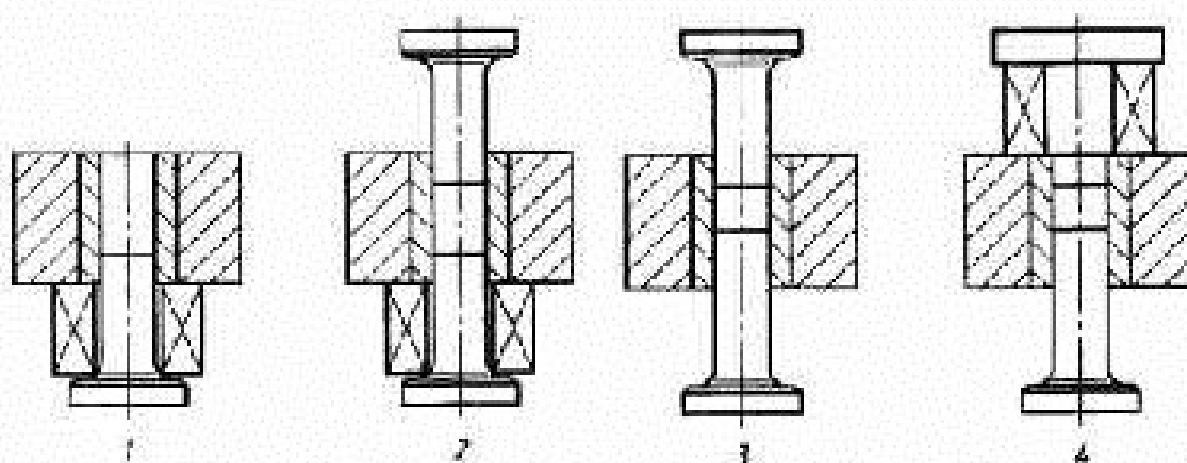
Во избежание прилипания серосодержащей композиции к пресс-форме стенки обмазывали машинным маслом и обволакивали графитным порошком.

Формирование происходило на универсальной машине QASAR 100 с установленной на нем термошкафом. Уплотнение происходило при постоянных температурах 110°C, 125 °C и 150 °C со скоростью нагружения 20 мм/мин и давлением 50 МПа схема прессования и выпрессовывания приведены на рисунке 3.1. В пресс-формах 10,16 и 20 мм. Параллельно в шкафу в пресс-формах нагревались составы.

В ходе работы изменялись следующие параметры:

- соотношение элементов;
- температура термообработки;
- время термообработки;
- давления прессования;

- размеры частиц.



1 - заполнение, 2 - предварительное прессование, 3 - прессование, 4 - выпрессовывание

Рисунок 3.1 – Схема последовательности прессования и выпрессовывания



Рисунок 3.2 – Исследуемые образцы

Исследуемые образцы имели форму цилиндра 10х15 мм (рисунок 3.2), такая форма обусловлена тем, что на машине трения удобно закрепить образцы цилиндрической формы, а так же испытание на предел прочности при сжатии и твердости удобнее всего цилиндрических деталей. Полученные образцы подвергались физико-механическим испытаниям.

3.1.3 Планирование состава и режимов изготовления композиций

Исследования по планированию состава композиций и режимов их получения проводятся с использованием метода многофакторного планирования эксперимента. В качестве основного параметра планирования принимается прочность на сжатие образцов из композиционных материалов

при определенных режимах получения и различных соотношений компонентов. Обозначаются X_1 , X_2 , X_3 компоненты в составе композиции на основе серного связующего.

Границы варьирования переменных выбираются проведением однофакторных (поисковых) экспериментов. Используя в серографитовой композиции несколько компонентов, ставится задача установления лучших сочетаний и реагирований между собой как это прогнозировалось в теоретической части.

Таблица 3.2 – Пределы варьирования компонентов состава

Название варьируемых компонентов	Условное обозначение кодировка	Содержание компонентов, %	
		Минимум	Максимум
Сера	$S - X_1$	15,0	50,0
Графит	$C - X_2$	10	60
Наполнитель	$H - X_3$	10	60

Согласно предполагаемым составам реализуется эксперимент для серографитового композиционного материала, где в качестве наполнителя (Н) подбираются различные порошки.

Таблица 3.3 – План – матрица эксперимента по обоснованию состава

Номера опытов	Переменные в условных водах		
	X_1	X_2	X_3
1	1	1	1
2	2	1	1
3	3	1	1
4	4	1	1
5	3	1	4
6	3	2	3
7	3	3	2
8	3	4	1

Для выявления оптимальных режимов получения материала ставится задача установления лучших сочетаний режимов при изготовлении.

Таблица 3.3 – Пределы варьирования режимов получения материала

Название варьируемых факторов	Условное обозначение кодировка	Значения переменных	
		Минимум	Максимум
Давление прессования, МПа	$P - X_1$	10,0	90,0
Температура термообработки, °C	$T - X_2$	110	175
Размер частиц, мм	$d - X_3$	0,05	1,2

Согласно предполагаемым режимам реализуется эксперимент для композиционного материала.

Таблица 3.4 – План – матрица эксперимента по обоснованию режимов

Номера опытов	Переменные в условных кодах		
	X_1	X_2	X_3
1	1	1	1
2	2	1	1
3	3	1	1
4	4	1	1
5	1	1	1
6	1	2	1
7	1	3	1
8	1	4	1
9	1	1	1
10	1	1	2
11	1	1	3
12	1	1	4

Полученные результаты являются основанием для выявления коэффициента регрессии показывающая значимость исследуемых переменных.

В ходе многофакторного эксперимента, все переменные варьируют на четырех уровнях, которые соответствуют кодированным значениям переменных (1,2,3,4). В результате чего, можно получить систему опытов, содержащие все возможные комбинации уровней варьирования переменных.

Локальная область факторного пространства с достаточной точностью описывается рядом Тейлора.

Функцией отклика (Y), принимается значение прочности на сжатие в первом случае от процентного соотношения серного связующего, процентного соотношения графита и наполнителей, во втором случае от давления прессования, температуры термообработки, размеров частиц и определяется из уравнения

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1^2 + b_8x_2^2 + b_9x_3^2, \quad (3.1)$$

где Y – функция отклика;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8$ – оценки коэффициентов регрессии, показывающие значимость факторов;

x_1, x_2, x_3 – значения факторов.

На величину прочности при сжатии, влияют следующие факторы:

- соотношение компонентов;
- давление прессование, МПа;
- температура термообработки, °С;
- время термообработки, мин;
- размер частиц, мм.

Варьирование факторов:

- соотношение компонентов – 15 – 50%;
- давление прессование – 10 – 90 МПа;
- температура термообработки – 110 – 175 °С;
- время термообработки – 30 – 120 мин;
- размер частиц – 0,05 – 1,2 мм.

Матрица планирования экспериментов составлена в соответствии с методикой, предложенной Д. Финни [73]. На основании формулы кодирования можно получить входящие в матрицу планирования кодированные значения факторов которые являются основой уравнения регрессии:

$$X_i = \frac{x_i - x_{\text{ос}}}{\Delta x_i} \quad (3.2)$$

где X_i – безразмерная величина, которая варьируется от нижнего уровня «1» до верхнего уровня «4»;

x_i – натуральное значение фактора;

$x_{\text{ос}}$ – натуральное значение фактора на основном уровне;

Δx_i – интервал варьирования.

Интервал варьирования определяется через соотношение:

$$\Delta x_i = \frac{x_i^{\text{в}} - x_i^{\text{н}}}{2} \quad (3.3)$$

где $x_i^{\text{в}}$ и $x_i^{\text{н}}$ – натуральные значения фактора на нижнем и верхнем уровнях.

Средние арифметические значения функции отклика на каждую серию параллельных экспериментов рассчитаны по формуле:

$$Y_{\text{срj}} = \frac{1}{K} \sum_{N_{\text{срj}}=1}^K Y_{N_{\text{срj}}} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, N_{\text{ф}}), \quad (3.4)$$

где K – число параллельных опытов, проведенных при одинаковых условиях (в нашем случае $K = 3$);

$N_{\text{срj}}$ – число опытов по принятой матрице планирования эксперимента.

Оценка дисперсии для каждой серии параллельных опытов определяется из выражения:

$$S_j^2 = \frac{1}{K} \sum_{N_{\text{срj}}=1}^K (Y_{N_{\text{срj}}} - Y_{\text{срj}})^2 \quad (3.5)$$

Проверка воспроизводимости опытов осуществляется расчетным значением критерия Кохрена:

$$G_p = \frac{\max_j S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} \quad (3.6)$$

Величина G_p сравнивается с табличным значением критерия Кохрена G .

3.1.4 Оборудование для изготовления и испытания композиционного материала

По ходу получения образцов и их испытания применялись следующие оборудование:

- шаровая мельница представлена на рисунке 3.3 применялась для тонкого помола порошков и в некоторых способах приготовления смеси для перемешивания состава.

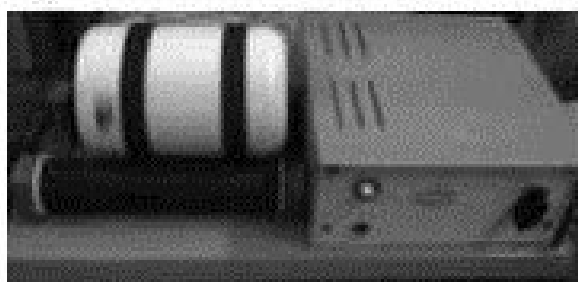


Рисунок 3.3 – Шаровая мельница MLW 4600 тип KM – 25

- сито вибрационное представлено на рисунке 13 применялась для просеивания порошков до тонны 0,05-0,4 мм.



Рисунок 3.4– Сито вибрационное тип – thyr 2; va 80 Nr 870347. made in GDR

- пресс – форма размером 10×60 мм представлено на рисунке 3.5, применялась прессования состава в виде цилиндров 10×10мм.

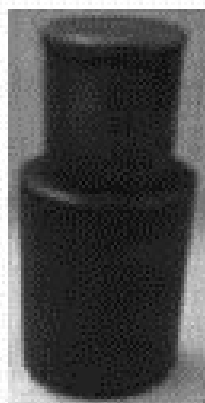


Рисунок 3.5 – Пресс-форма изготовления образцов для испытаний

- универсальная машина QASAR100 представлено на рисунке 3.6, применялась для прессования состава при приготовлении образцов, и во время испытаний на прочность при сжатии и растяжении.

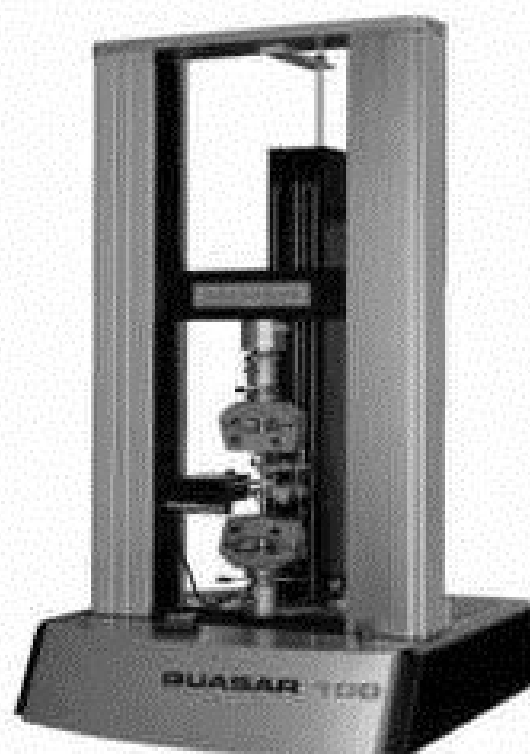


Рисунок 3.6 – Универсальная машина QASAR100

- машина трения 77 – 1 НТ

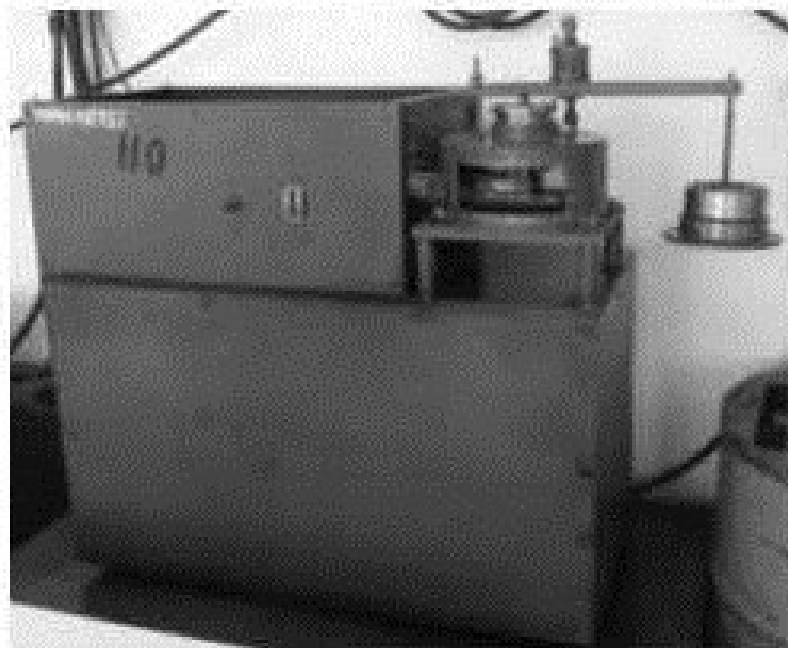


Рисунок 3.7– Общий вид машины трения 77 – 1 НТ

3.2 Методика лабораторных испытаний опытных образцов

Оптимальные составы и свойства композиционных материалов проводили, опираясь на следующие физико-механические методы испытаний: предел прочности при сжатии, водопоглощение, износостойкость.

3.2.1 Методика определения прочностных характеристик опытных образцов

- На предел прочности при сжатии испытывали образцы – цилиндры с размерами 10×15мм. Испытания проводились на универсальной машине QASAR100. ГОСТ 8462-85 «Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе».

- Плотность композиционных материалов определяли, полагаясь согласно ГОСТ 12730.1-78 «Методы определения плотности». Методика определения плотности заключается в следующем: образцы выдерживались на воде в течении двух часов для насыщения водой, затем протирались мягкой тканью, взвешивались на весах точностью 0,1 г. и погружались в сосуд с водой

заполненной до отвода. После погружения образца вода вытесняется по отводу вытекает в мерный цилиндр и измеряя мерным цилиндром объем вытесненной воды определяют объем образца после чего подставляя значения в формулу 3.1 определяют плотность в г/см^3 .

$$\rho = m / V \quad (3.7)$$

где m – масса образца, г;

V – Объем вытесненной воды, мл.

Определение плотности повторяли три раза и подсчитывали средний результат.

3.2.2 Методика определения на водопоглощение

- водопоглощение определяют по ГОСТ 12730.3-78 «Метод определения водопоглощения».

Водопоглощение рассчитывается по формуле (3.8):

$$B_{\text{н}} = \frac{m_{\text{вл}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}}} \times 100\% \quad (3.8)$$

где $m_{\text{вл}}$ – масса влажного образца, г;

$m_{\text{сух}}$ – масса сухого образца, г.

3.2.3 Методика определения износостойкости

Появлению новых материалов в конструкциях сельскохозяйственных машин должны предшествовать тщательные исследования их в лабораторных условиях, гарантирующие надежность производственной эксплуатации, более того это относится к антифрикционным материалам подшипников скольжения, от которых зависит срок службы всей машины. Для успешного решения лабораторных исследований, экспериментальная установка должна обеспечивать максимальное приближение к условиям работы подшипников скольжения и одновременно с этим исключать причины, усложняющие и искажающие явления.

Испытание на трение и износ композиционного материала предназначенное для подшипника скольжения проводилось на машине трения 77 – МТ 1 по схеме «вал – частичный валадьяш». Для этого подготовили образцы размером 10x15 мм, изготовленные из композиционных материалов, и провели испытания на износостойкость с различными нагрузками и при различных режимах. Контролем были взяты сегменты из коленчатого вала главного механизма солоотряса комбайна серии «Енисей». Площадь контакта составляла 1 см², скорость скольжения 0,5 м/сек и нагрузка 12,5 кг/см². Все испытания велись в режиме воздушно-сухого трения при температуре не выше 80°C, замеренной на расстоянии 1 мм от поверхности трения. Определение величины износа сопряженных образцов производилось их взвешиванием до и после испытания на аналитических весах 4 класса точности позволяющих измерять отклонения в весе образца до 0,0002 г. Контроль линейного износа проводили микрометром МК – 25 ГОСТ 6507-78, массового износа аналитическими весами ВЛР – 200 ценой деления 0,0002 г.

Для исключения влияния влагосодержания и т. п. на точность взвешивания предварительно проводилась подготовка образцов, она заключалась в промывке их в спирте и удалении влаги путем сушки в термощкафу 50 °С, в течение 30 мин., затем снова устанавливались на машину трения. Каждый опыт повторялся по 3 раза. Ошибка при измерении не превышала 5%. После проведения измерения строили график зависимости износа от времени.

На машине трения исследовались такие факторы как:

- 1) Температура нагрева зоны контакта трения скольжения, °С;
- 2) Продолжительность работы, час;
- 3) Нагрузка на испытываемый образец, МПа;
- 4) Коэффициент трения в условиях работы воздушно-сухого трения.

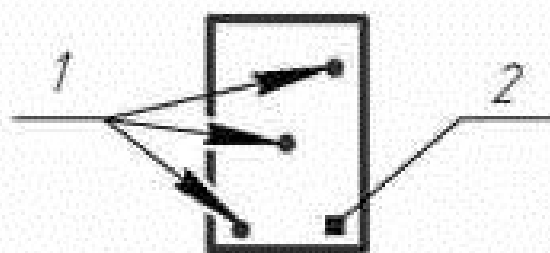
3.3 Методика определения и регистрации тепловых изменений, напругных образцов

Измерение температуры поверхностей пар трения в процессе работы представляет большой практический интерес. Известно, что рабочая температура оказывает существенное влияние на работоспособность и долговечность подшипников скольжения. Очень часто из-за повышенного температурного режима происходит нарушение нормального режима работы подшипников скольжения. Это связано с малой теплопроводностью полимерных материалов и низкой температурой плавления, что может привести изменению физико-механических свойств с повышением температуры, в связи, чем и появляется острая необходимость достаточно точно и строго подходить к определению действительных температур, развивающихся между трущимися поверхностями.

Для определения и регистрации тепловых изменений, контрольных образцов процессе трения использовалась машина трения 77 – МГ 1, скорость скольжения 0,5 м/сек и нагрузка 12,5 кг/см². Контрольный образец устанавливается на специально изготовленном держателе, которая жестко закреплена на станиннике присоединенным на нем грузом. Груз на контрольный образец передает усилие через рычажный механизм. Такой способ нагружения контрольных образцов обеспечивает требуемую величину планируемого усилия на образце.

Измерение средней рабочей температуры поверхностей трения в процессе исследования производилась хромель-копелевыми термопарами с помощью цифрового мультиметра DT 830B способной измерять при диапазоне температур от -20 до +1357. Устанавливали термопары путем высверливания отверстий диаметром 0,6 мм на глубину 0,5 мм приклеиванием их эпоксидным клеем.

Схема установки термопар в контрольном образце представлена на рисунке 3.8.



1- места установки термопар, 2- контрольный образец

Рисунок 3.8 - Схема размещения термопар в образце

С помощью такой схемы размещения термопар можно определить среднюю температуру по всему объему контрольного образца, а также температуру на расстоянии 1 мм от поверхности трения

Общий вид испытательной машины представлен на рисунке 3.7.

3.4. Методика проведения эксплуатационных исследований подшипников скольжения

Во время эксплуатации сельскохозяйственных машин, а частности зерноуборочные комбайны выходят из строя по причине отказов подшипниковых узлов, это связано со спецификой условий их работы. Специфика условий заключается в том, что подшипниковые узлы в отличие от других отраслей подвергаются значительным абразивным и коррозионным видам изнашивания. И выход из этого на сегодняшний день применение дополнительной смазки в период эксплуатации, или применение самосмазывающихся композиционных материалов. Ранее на многих узлах трения сельскохозяйственных машин применялись древесные материалы т.к. древесина является антифрикционным материалом. Если взять, к примеру, зерноуборочный комбайн серии Енисей на клавишном механизме соломотряса применялись древесные подшипники скольжения (рисунок 3.8), они обладали хорошими антифрикционными и демпфирующими свойствами, но утратили свое применение вследствие плохой теплопроводности.

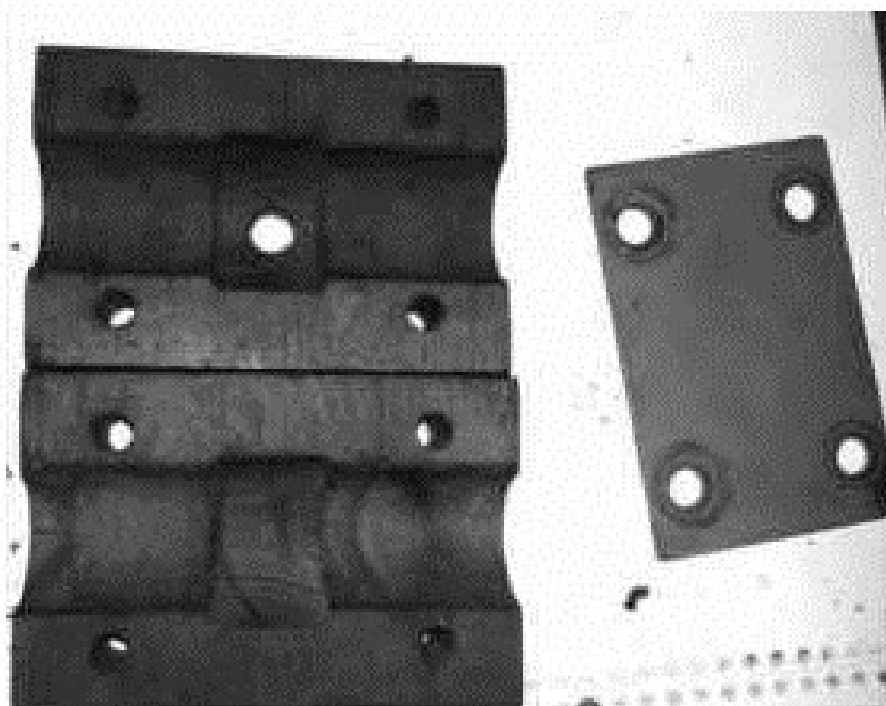
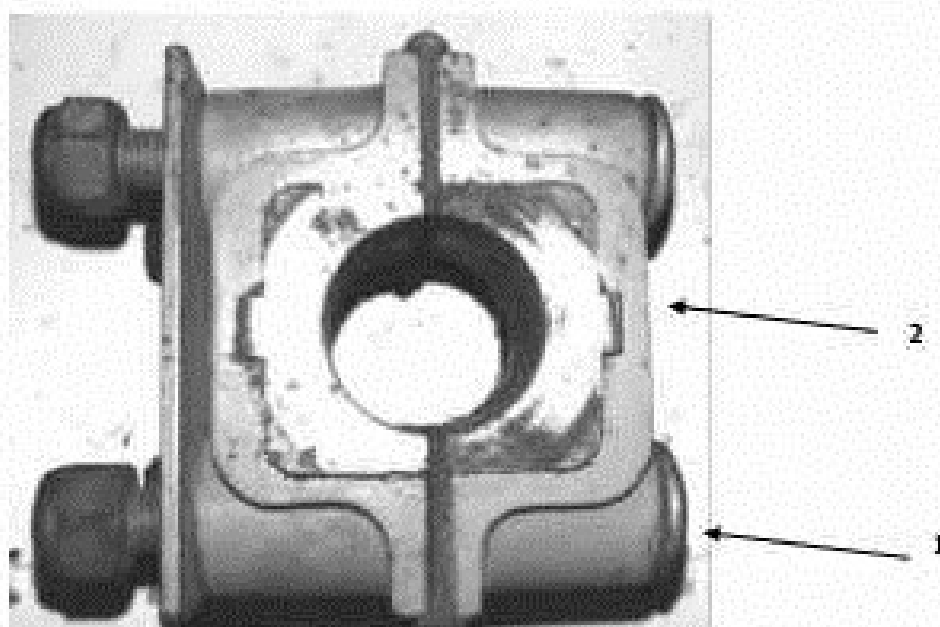


Рисунок 3.9 – Деревянный подшипник клавишного механизма соломотряса зерноуборочного комбайна Енисей 1200

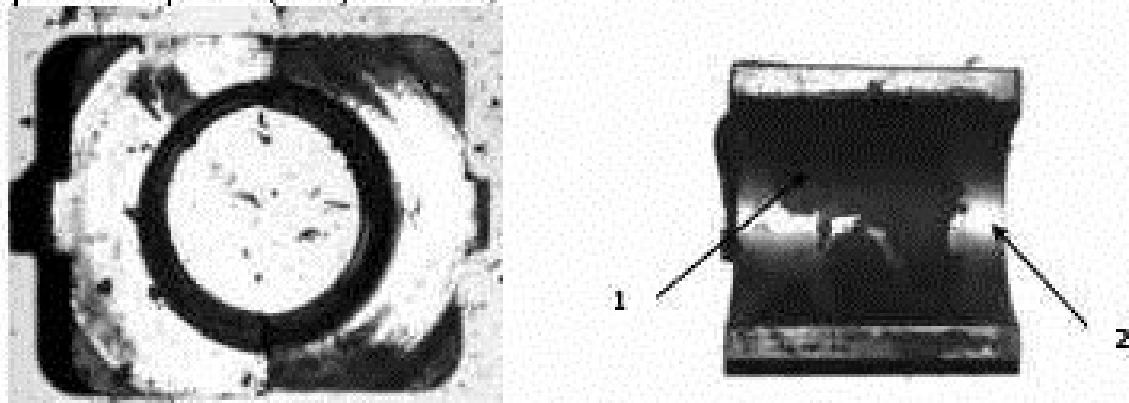
Установить вместо деревяшек подшипников металлокерамические вкладыши (Рисунок 3.10), обладающие отличными антифрикционными и теплопроводными свойствами.



1 – корпус подшипника, 2 – металлокерамический вкладыш

Рисунок 3.10 – Подшипник скольжения с металлокерамическим вкладышем клавишного механизма соломотряса зерноуборочного комбайна Енисей 1200

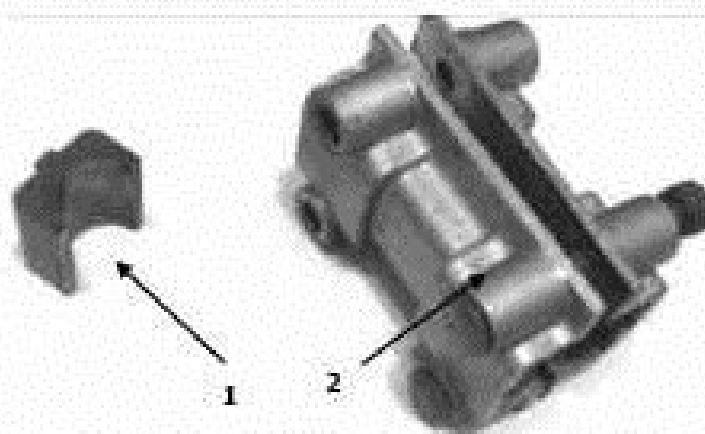
Но, несмотря на достоинства металлокерамические вкладыши, пропитаны маслом, т.е. их вытеснили в масле (процесс морения), в процессе работы данным узлов наблюдается такой негативный фактор как износ коленчатого вала соломотряса, что категорически не допустимо. Это явление связано с накоплением большого количества абразивных частиц на поверхности трения (Рисунок 3.11).



1 – Абразивное загрязнение, 2 – Металлокерамический вкладыш

Рисунок 3.11 – Результат работы металлокерамических вкладышей после сезонной работы

В связи с выше сказанным планируется применить серографитовый композиционный материал для изготовления вкладышей подшипникового узла вращающего механизма соломотряса Енисей 1200. Исследуемый узел показан на рисунке 3.12



1- вкладыш из серографитового композиционного материала,

2 – корпус подшипника

Рисунок 3.12 – Общий вид испытываемого подшипникового узла со серографитовым вкладышем

Испытания проводились на действующих комбайнах Енисей 1200 в ООО Калинин Мензелинского муниципального района РТ.

Перед началом испытаний проводилась разборка подшипниковых узлов ведомого коленчатого вала соломотряса, на ведущем оставили стандартные вкладыши т.к. на ведомом валу удобнее проводить разборочные и сборочные операции. После разборки проводились замеры размеров шеек коленчатого вала при помощи микрометра МК 25-50 согласно схеме замеров на рисунке 3.13. Сборка осуществлялась в такой же последовательности, как и разборка, но вместо металлобразцовых вкладышей устанавливали вкладыши из композиционного материала.

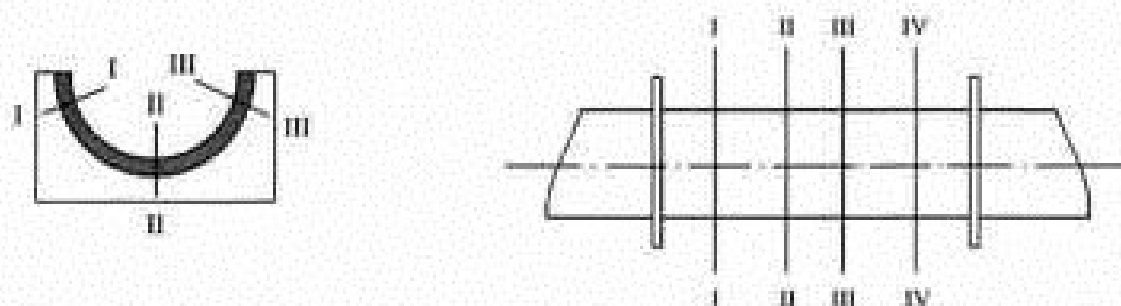


Рисунок 3.13 – Схема замеров вкладышей и коленчатого вала

После проведения замеров переходили к испытательным операциям при следующих режимах:

- частота вращения коленчатого вала соломотряса составляет 195 мин^{-1}
- нагрузка на каждый подшипник 15 кг
- продолжительность (наработка) 1300 часов

Во время испытания после каждой 300 часов наработки проводятся замер вала и вкладыша, согласно схеме на рисунке 3.13. в процессе работы фиксировались следующие параметры натурных образцов подшипников:

- 1) Температура нагрева подшипника и вала, $^{\circ}\text{C}$;
- 2) Продолжительность работы, час;
- 3) Нагрузка на подшипник, МПа;
- 4) Зазоры между валом и вкладышем, мм;
- 5) Шероховатость поверхностей;

4) Крутящий момент на коленчатом вале.

3.5 Выводы по разделу

1. Разработана методика формирования и получения композиционных материалов.
2. Приведена методика лабораторных исследований полученных образцов.
3. Разработана методика определения и регистрации тепловых изменений, натуральных образцов
4. Дана методика проведения эксплуатационных испытаний подшипников скольжения из композиционных материалов.
5. Используя существующие методики и приведенные выше технические средства измерений и оборудования для изготовления можно получить достоверные результаты с высокой точностью.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Согласно с разработанной методикой экспериментов проводились различные исследования, которые позволяют определить условия и режимы получения серографитовых композиционных материалов, которые зависят от многих факторов, таких как размеры и формы частиц, состав и соотношения компонентов в %, способ изготовления, температурно-временные режимы, которые проверялись физико-механическими свойствами. После определения физико-механических свойств материалов открывается возможность определения закономерности протекания износных испытаний, при котором определяются такие факторы как температурный режим, массовый и линейный износ.

4.1. Определение составов и получение образцов из композиционных материалов

Задачей исследований являлось определение оптимальных режимов получения композиционных материалов, определением состава и соотношения компонентов, применимых в качестве материала для подшипников скольжения.

Согласно с задачами исследований были проведены ряд опытов для установления пределов варьирования факторов влияющих на положительные свойства получаемого композиционного материала. Начальным фактором, подтверждающим оптимальные режимы изготовления, является прочность на сжатие и по повышению прочностных характеристик проводились поисковые эксперименты.

Для рассмотрения возможности получения неорганических соединений на основе серного связующего, необходимо знать свойства серы как основного компонента. Сера способна проявлять себя как донор и акцептор, что способствует к образованию химической связи. Возможность

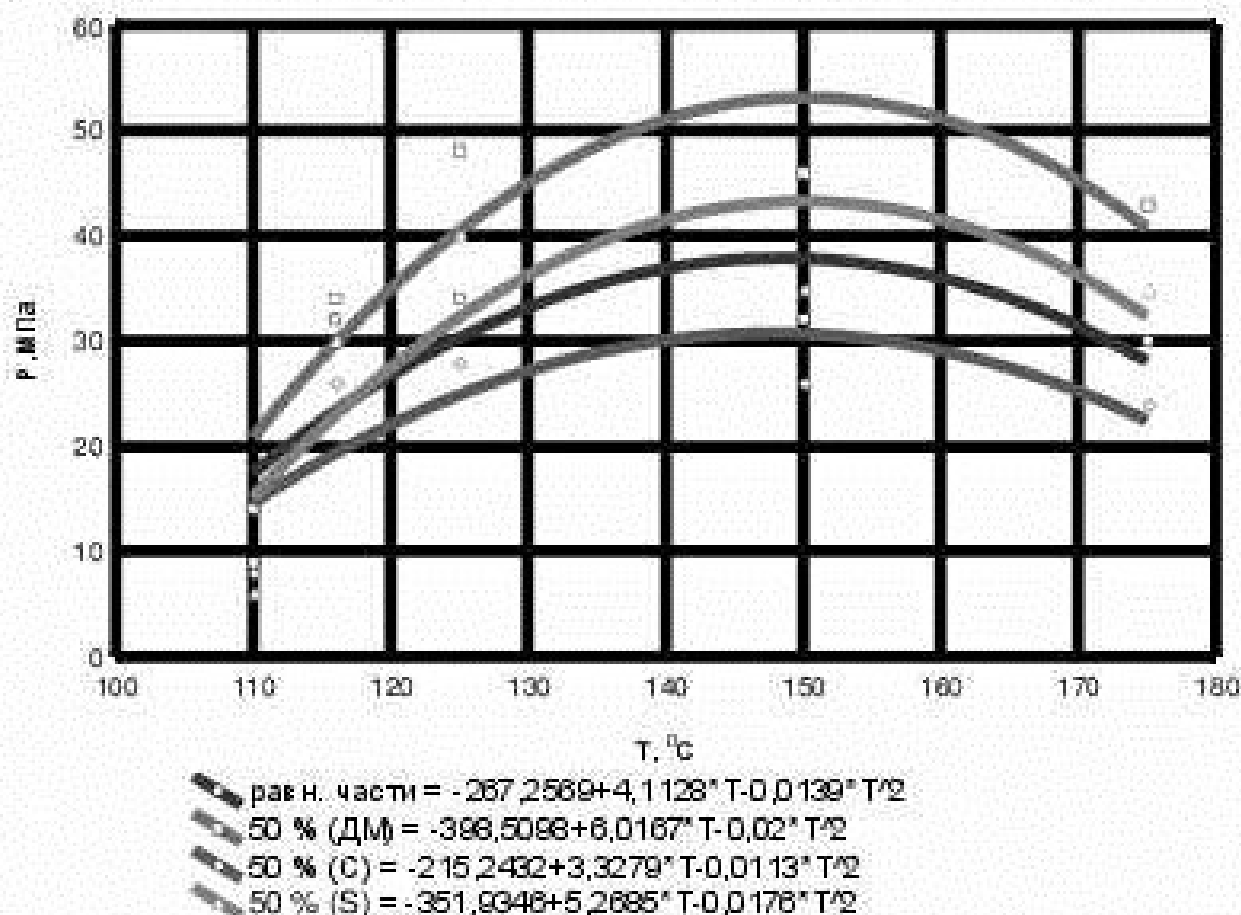
использования серы в качестве связующего в получении композиционных материалов объясняется с ее химическими свойствами и электронным строением. Сера в твердом состоянии относительно инертна. Химически активной становится при нагревании, температура плавления серы 116°C , и по данным научно технической литературы начинает вступать в химические реакции в пределах температур $130-200^{\circ}\text{C}$, при таком интервале температур сера реагирует в виде бирадикалов S_2 , в связи с чем и инициирует радикальные превращения. С металлами сера образует сульфиды и полисульфиды, а это положительно влияет на снижение коэффициента трения и повышает интерес применения в качестве антифрикционных материалов. С кислородом начинает взаимодействовать только при температуре 300°C , при этом образует оксиды SO_2 и SO_3 , приводящие к образованию кислот и солей. Это очень негативный фактор для узлов трения в контакте со сталью т.к. приводит к коррозии, однако узел трения скольжения на сельскохозяйственных машинах не превышает температуру нагрева более 90°C , следовательно образование кислотных соединений не наблюдается.

4.1.1 Влияние температуры на прочность и плотность образцов

Для определения границ температуры термообработки композиционных материалов использовали специфические свойства серы, это начала плавления при температуре 116°C самой серы, необходимое для превращения твердой серы в жидкую фазу с целью обволакивания все наполнители, и температура начала образования химических реакций 200°C чтобы образовались химические связи для повышения прочностных характеристик и снижения сил трения.

Состав для определения температурных режимов взяли в различных соотношениях компонентов, согласно термодинамическому анализу по теоретическому обоснованию, которая показывает, какая композиция

наиболее экзотермична. Результаты экспериментальных исследований на рисунке 4.1:



$P_{\text{равн. части}}$ – при содержании серного связующего (S) – 33%, древесной муки (Д) – 33%, графита (г) – 34%; $P_{50\%(\text{Д})}$ – при содержании серного связующего (S) – 25%, древесной муки (Д) – 50%, графита (г) – 25%; $P_{50\%(\text{С})}$ – при содержании серного связующего (S) – 25%, древесной муки (Д) – 25%, графита (г) – 50%; $P_{50\%(\text{S})}$ – при содержании серного связующего (S) – 50%, древесной муки (Д) – 25%, графита (г) – 25%;

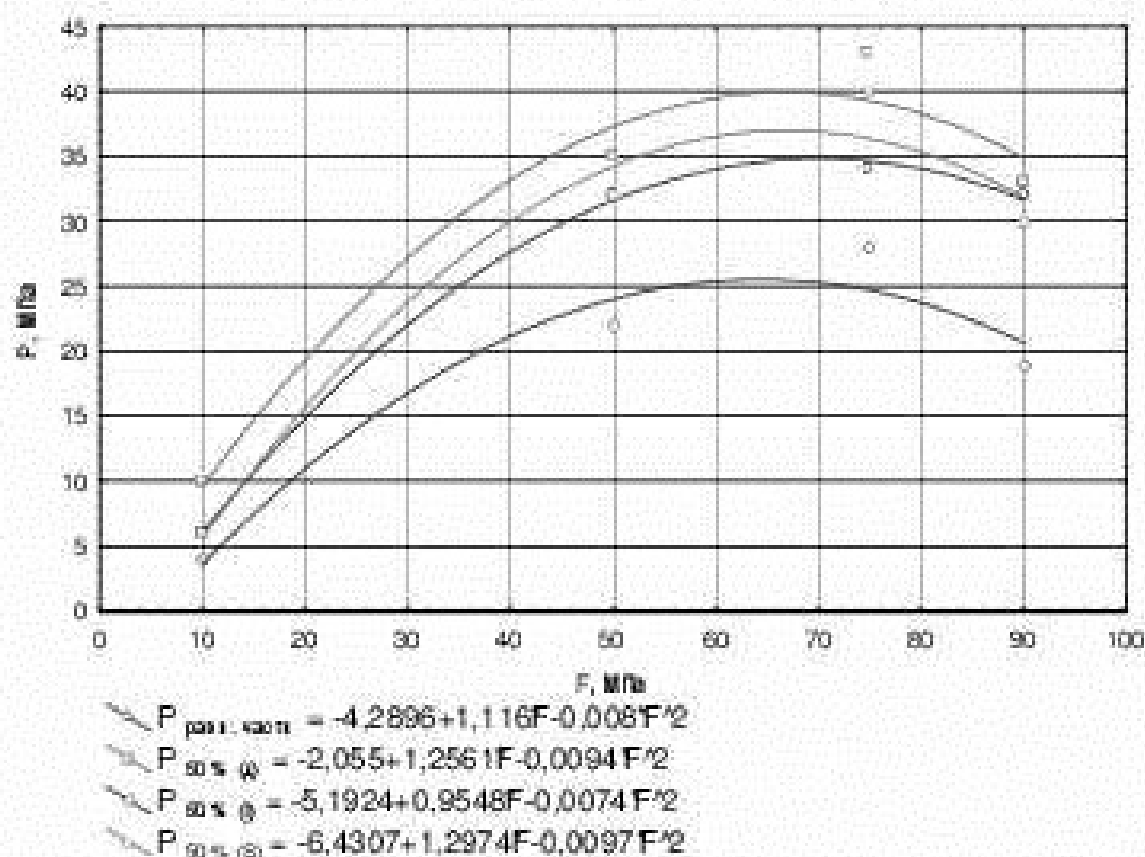
Рисунок 4.1 – Зависимость прочности образцов (P) от температуры термообработки (T)

В процессе исследования наблюдается, что при температуре 116°C прочность минимальна, это объясняется тем что сера при такой температуре только расплавляется и в жидком состоянии обволакивает все наполнители т.е. связи компонентов только физические, химические же соединения происходят температуре 125-200°C, что подтверждается графиками экспериментов, но прочность проходит максимума при температуре 125°C за тем наблюдается снижение прочности, это объясняется тем, что при

повышении температуры более 125°C образуются поры в составе вследствие образование газов выделяемых от химических преобразований, повышение температуры более 125°C и менее 300°C способствует химическим преобразованиям соединения но повышается пористость и снижаются прочностные характеристики, для изготовления подшипников скольжения достаточно температура термообработки от $125 - 140^{\circ}\text{C}$.

4.1.2 Влияние давления прессования на прочность

Для определения границ давления F прессования процентных соотношений композиционных материалов проведены эксперименты по прочности на сжатие и относительной плотности



$P_{\text{разн. (S)}}$ – при содержании серного связующего (S) – 33%, древесной муки (D) – 33%, графита (Г) – 34%; $P_{50\% (D)}$ – при содержании серного связующего (S) – 25%, древесной муки (D) – 50%, графита (Г) – 25%; $P_{50\% (S)}$ – при содержании серного связующего (S) – 25%, древесной муки (D) – 25%, графита (Г) – 50%; $P_{50\% (S)}$ – при содержании серного связующего (S) – 50%, древесной муки (D) – 25%, графита (Г) – 25%;

Рисунок 4.2 – Зависимость прочности образцов (P) от давления прессования (F)

Как видно из рисунков с повышением давления прессования прочность повышается и проходит максимума при давлении прессования 75 МПа, а повышение более не дает лучшего результата, это говорит о хорошей уплотняемости состава. Наилучший результат наблюдается с составом сера-25%, графит-25%, древесная мука-50%, что хорошей уплотняемостью древесной муки.

4.1.3 Влияние времени термообработки на прочность и плотность образцов

Время выдержки образцов в сушильном шкафу оказывает существенное влияние на их прочность (рисунок 4.3). Так, при увеличении времени нагрева от 30...135 мин прочность образцов увеличивается, проходит максимума при 60 мин и затем снижается. Оптимальное время нагрева, при котором образец имеет максимальную прочность, составляет 60 минут.

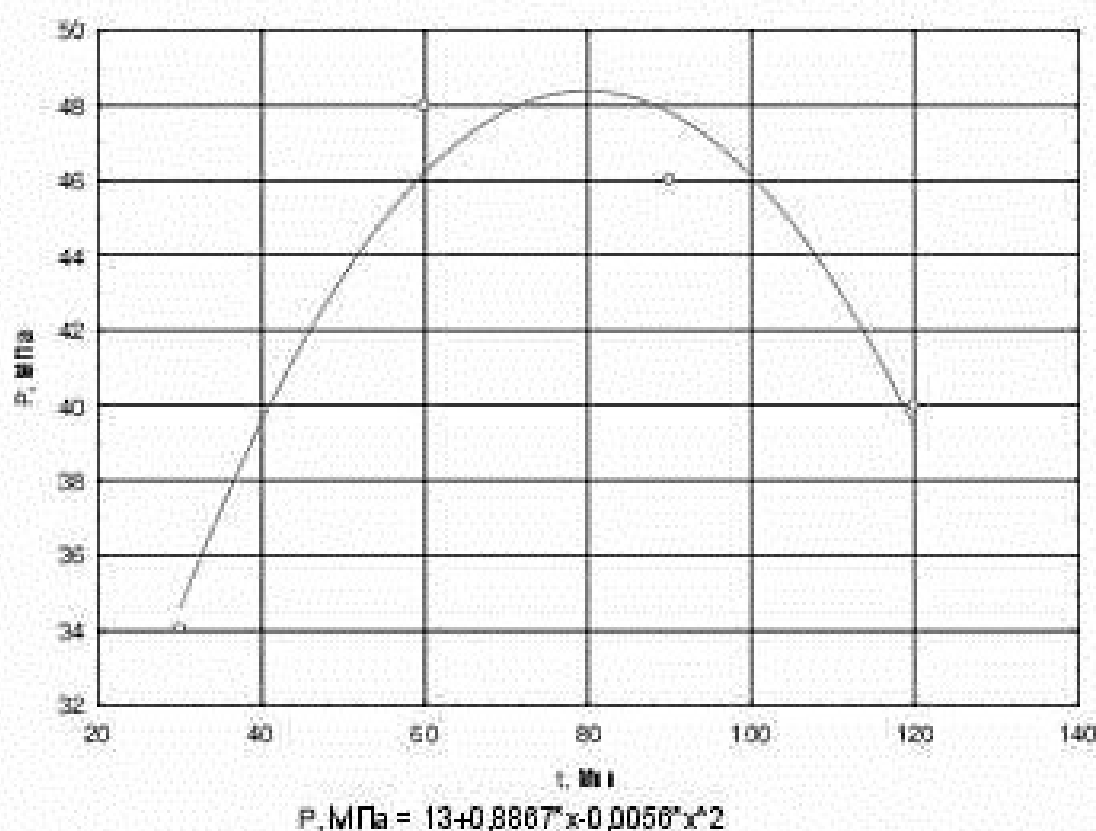


Рисунок 4.3 – Зависимость прочности от времени термообработки

Прочность образцов полученных при выдержке в сушильном шкафу в течение 30 мин в 4 раза ниже прочности образцов полученных при 60 мин выдержки. Такое снижение можно объяснить тем, что сера, в течение 30 минут не успевает полностью расплавиться и обволакивать частицы наполнителей и связывать их друг с другом. При обработке образцов в течение 60 мин сера полностью расплавляется, обволакивает все частицы наполнителей, образуется прочная монолитная система. Более длительная выдержка образцов в сушильном шкафу при 125°C сера расплавляется, выплывает на поверхность образцов и прочность снижается.

4.1.4 Влияние размеров частиц наполнителей на прочность и плотность образцов

Не малое значение для прочности композиций имеет также форма и размер частиц, так например, известно, что более угловатые и заостренные формы частиц наполнителя дают прочность выше, чем кругловатые и гладкие, это объясняется прочностью сцепления наполнителя и серного связующего. По определению зависимости прочности от размеров частиц наполнителей проведены экспериментальные исследования показанные на рисунке 4.4.

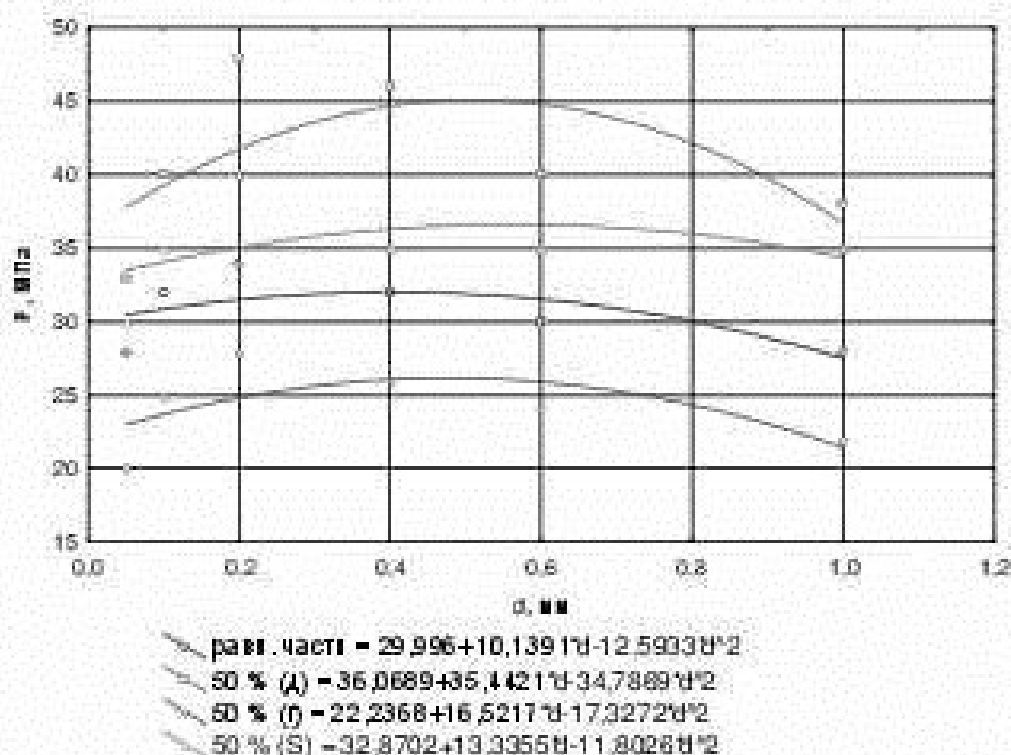


Рисунок 4.4 – Зависимость прочности от размеров частиц наполнителя

Исследования показали, что с уменьшением размеров частиц наполнителей прочность образцов повышается и наоборот до размеров 0,2 мм. При очень высокой дисперсности частиц (менее 0,2 мм) получение качественного образца затруднялось вследствие плохой уплотняемости в пресс-форме. Образцы с размером частиц более 0,2 мм значительно повышают пористость и снижают прочность.

4.1.5 Влияние соотношений состава на прочность образцов

С целью подтверждения теоретических исследований, а именно термодинамического анализа по подбору компонентов для композиционного материала были проведены экспериментальные исследования в зависимости от процентного соотношения компонентов и рода наполнителей. В качестве варьируемого элемента было взято серное связующее, которое менялось от 15...50%.

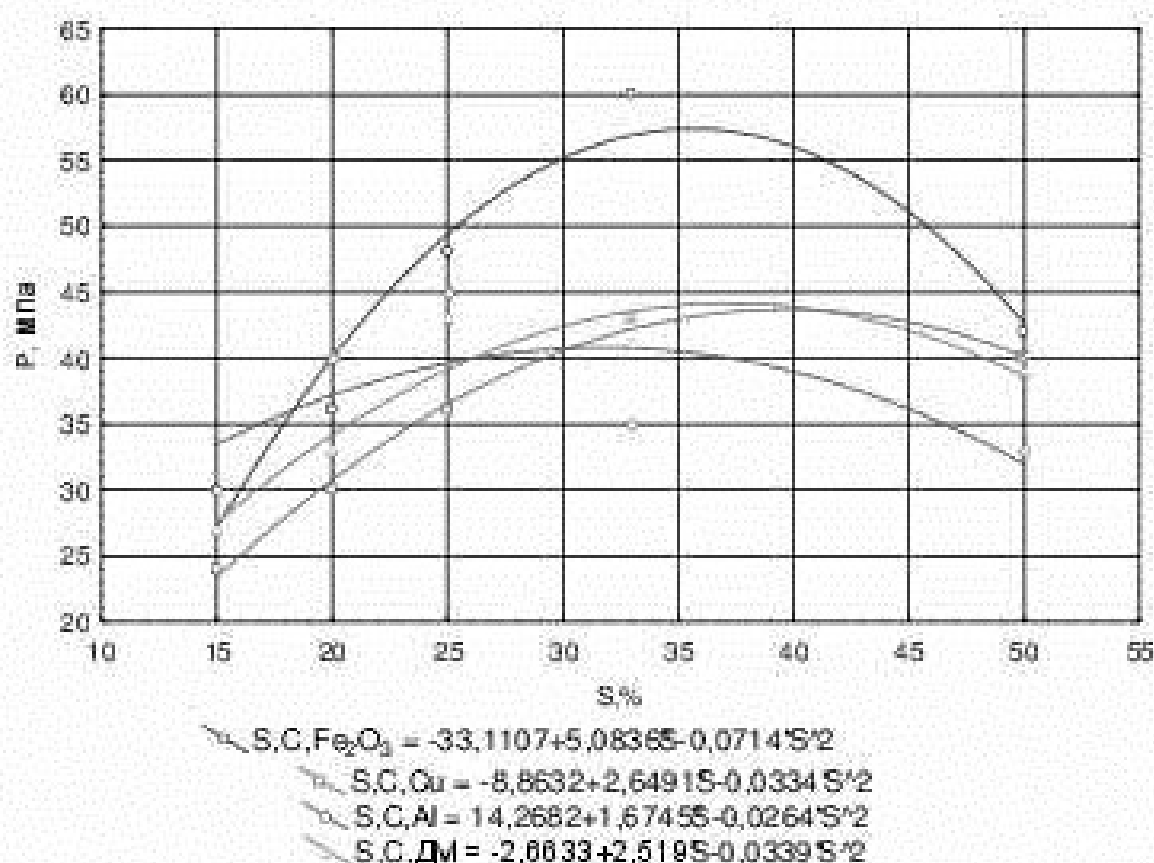


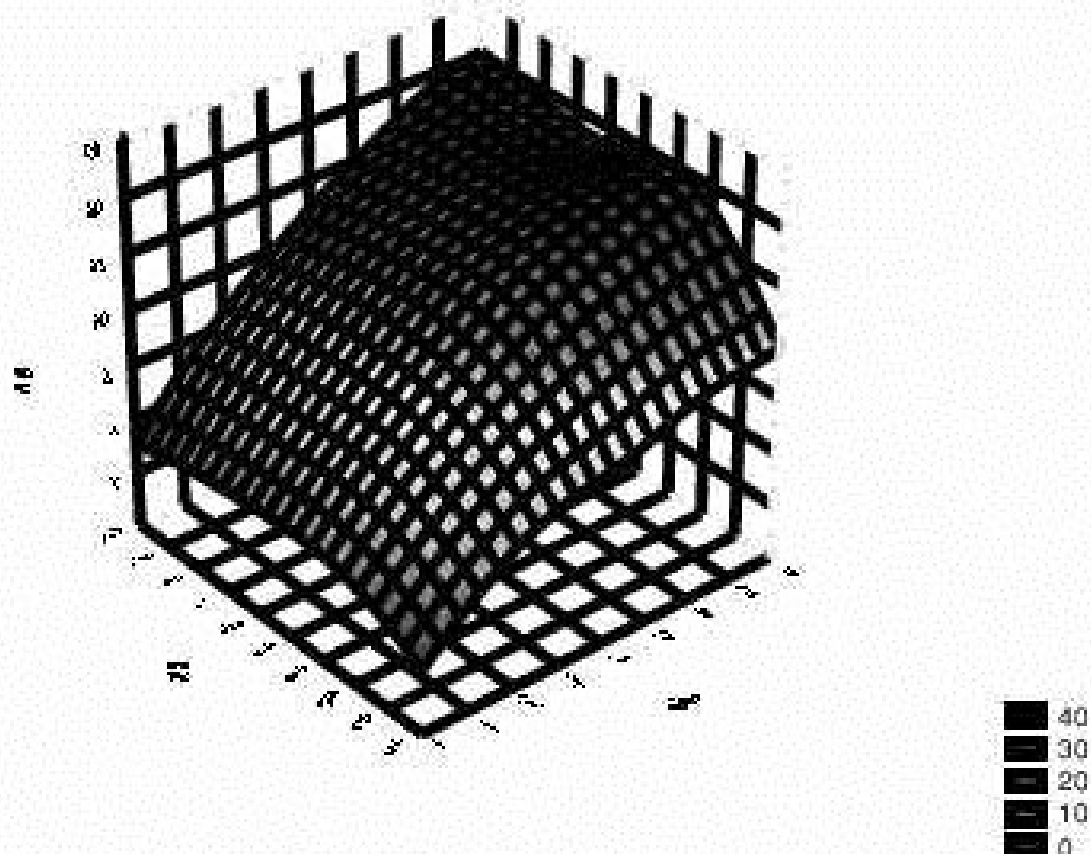
Рисунок 4.5 – Зависимость прочности от процентного соотношения серного связующего с различными компонентами

По графику видно, что на различных составах с разными компонентами оптимальное содержание серного связующего колеблется 25...35%.

Таблица 4.1 – Исследование влияния содержания серного связующего при различных давлениях прессования на прочность

N п/п	Переменные		
	Прочность, МПа (y_1)	Давление прессования МПа (x_1)	Содержание серы масс %, (x_2)
1.	3	10	15
2.	9	10	25
3.	7	10	35
4.	6	10	50
5.	21	50	15
6.	35	50	25
7.	31	50	35
8.	31	50	50
9.	27	75	15
10.	44	75	25
11.	33	75	35
12.	39	75	50

Задаваемая модель: $y_1 = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_1 \cdot x_2 + b_4 \cdot x_1^2 + b_5 \cdot x_2^2$



(y1) прочность, МПа ; (x1) давление прессования, МПа; (x2) - Содержание серы масс. %

Рисунок 4.6 – График зависимости содержания серного связующего при различных давлениях прессования на прочность

$$y1=4,42609+1,06315*x1+21,9661*(-0,3934)+(0,447714)*x1*(-0,3934)+(-0,0051)*x1**2+(0,00184)*x2**2$$

После проведения ряда экспериментов определялись режимами получения композиционного материала и для дальнейших исследований применяли постоянные значения:

- Температуры термообработки $T = 125^{\circ}\text{C}$,
- Давления прессования $P=75$ МПа,
- Время термообработки $t=60$ минут,
- Размеры частиц наполнителей 0,2 мм,

4.2 Испытание опытных образцов композиций по их физико-механическим характеристикам

Для выявления физико-механических свойств материала испытывали на прочность при сжатии образцы – цилиндры с размерами 10×15мм. Испытания проводятся на универсальной машине QASAR100 со скоростью нагружения 1-20 мм/мин.

Для сравнения прочностных характеристик испытывали различные составы в различных соотношениях, при которых серное связующее варьировалась, как было выявлено ранее 25...35 масс. %, наполнители 15...50%.

Таблица 4.2 – Результаты исследования композиции (S+C+ Fe₂O₃)

Система 1			
S, % масс.	C, % масс.	Fe ₂ O ₃ , % масс.	P, МПа
30	10	60	36
30	20	50	42
30	30	40	48
30	40	30	60
30	50	20	42
30	60	10	30

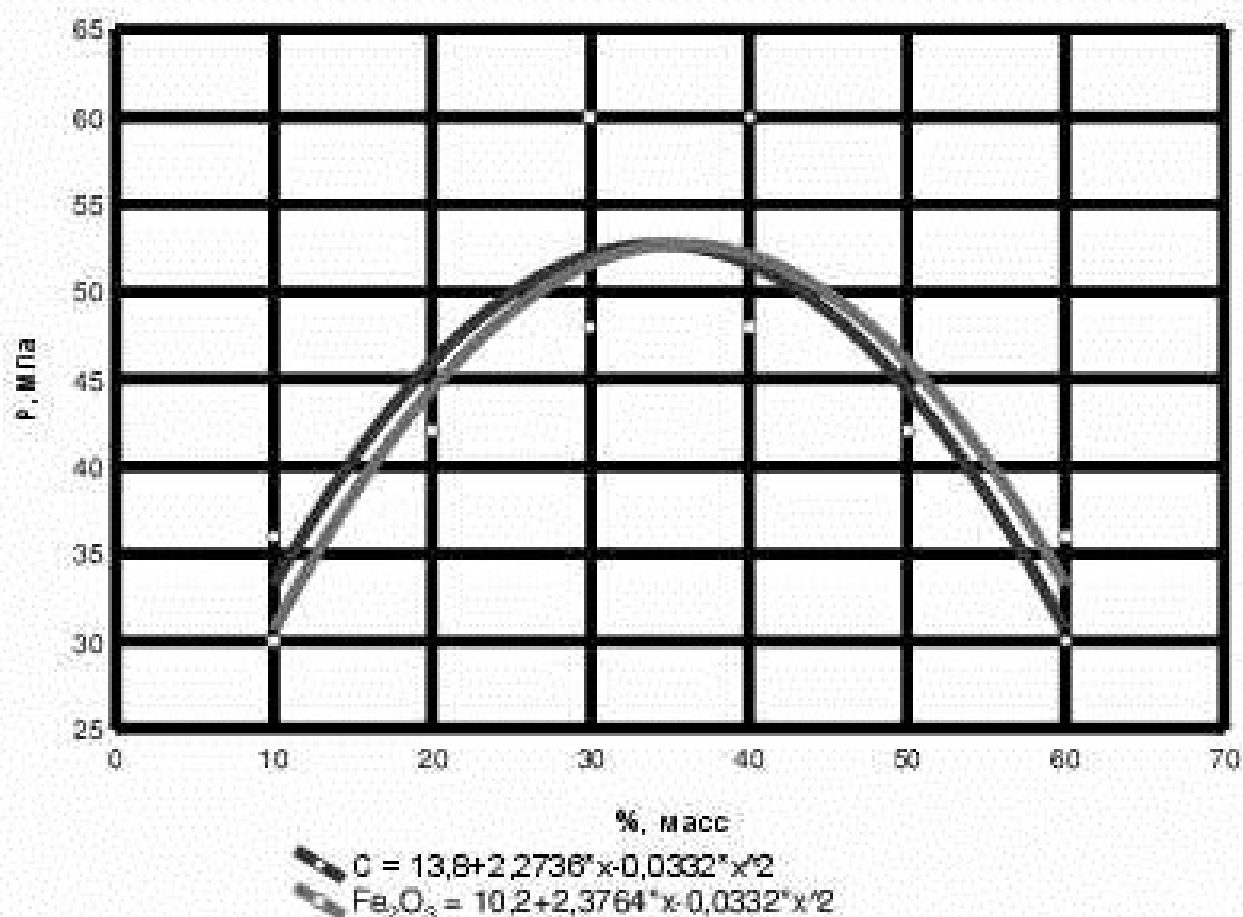


Рисунок 4.7 – Зависимость прочности от процентного соотношения наполнителей с серным связующим в композиции S-C-Fe₂O₃.

По графику видно, что прочность проходит максимума 60 МПа при процентном содержании графита (C) – 40%, окиси железа (Fe₂O₃) – 30%, в этой системе сера (S) остается постоянной – 30%.

Таблица 4.2 – Результаты исследования композиции (S+C+ Al)

Система 2			
S, % масс.	C, % масс.	Al, % масс.	P, МПа
20	20	60	25
20	30	50	25
20	40	40	30
20	50	30	40
20	60	20	45
20	70	10	35

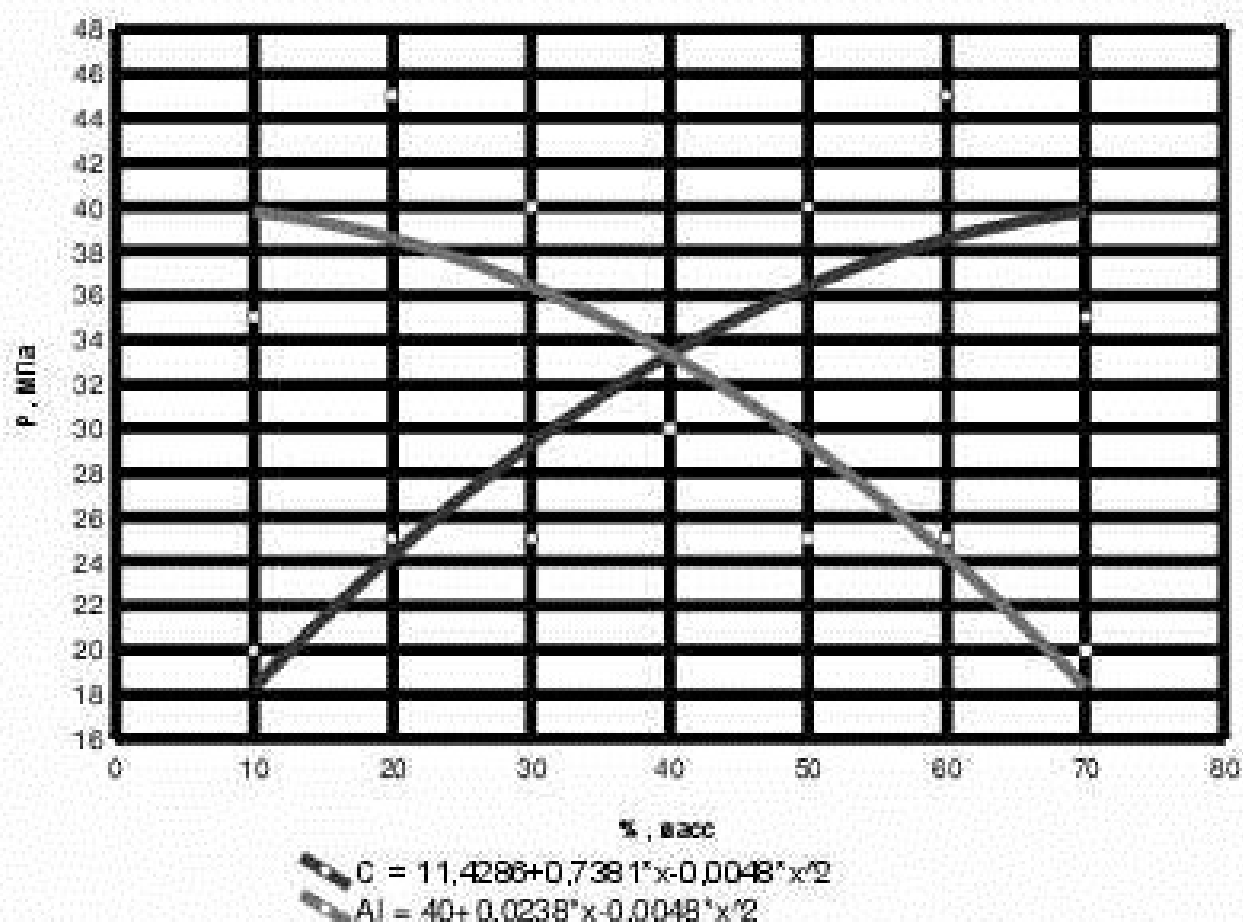


Рисунок 4.8 – Зависимость прочности от процентного соотношения наполнителей с серым связующим в композиции S-C-Al.

Прочность проходит максимума 45 МПа при процентном содержании графита (C) – 60 %, алюминия (Al) – 20%, в этой системе сера (S) остается постоянной – 20%.

Таблица 4.3 – Результаты исследования композиции (S+C+ Cu)

Система 3			
S, % масс.	C, % масс.	Cu, % масс.	P, МПа
30	10	60	43
30	20	50	36
30	30	40	30
30	40	30	28
30	50	20	25
30	60	10	25

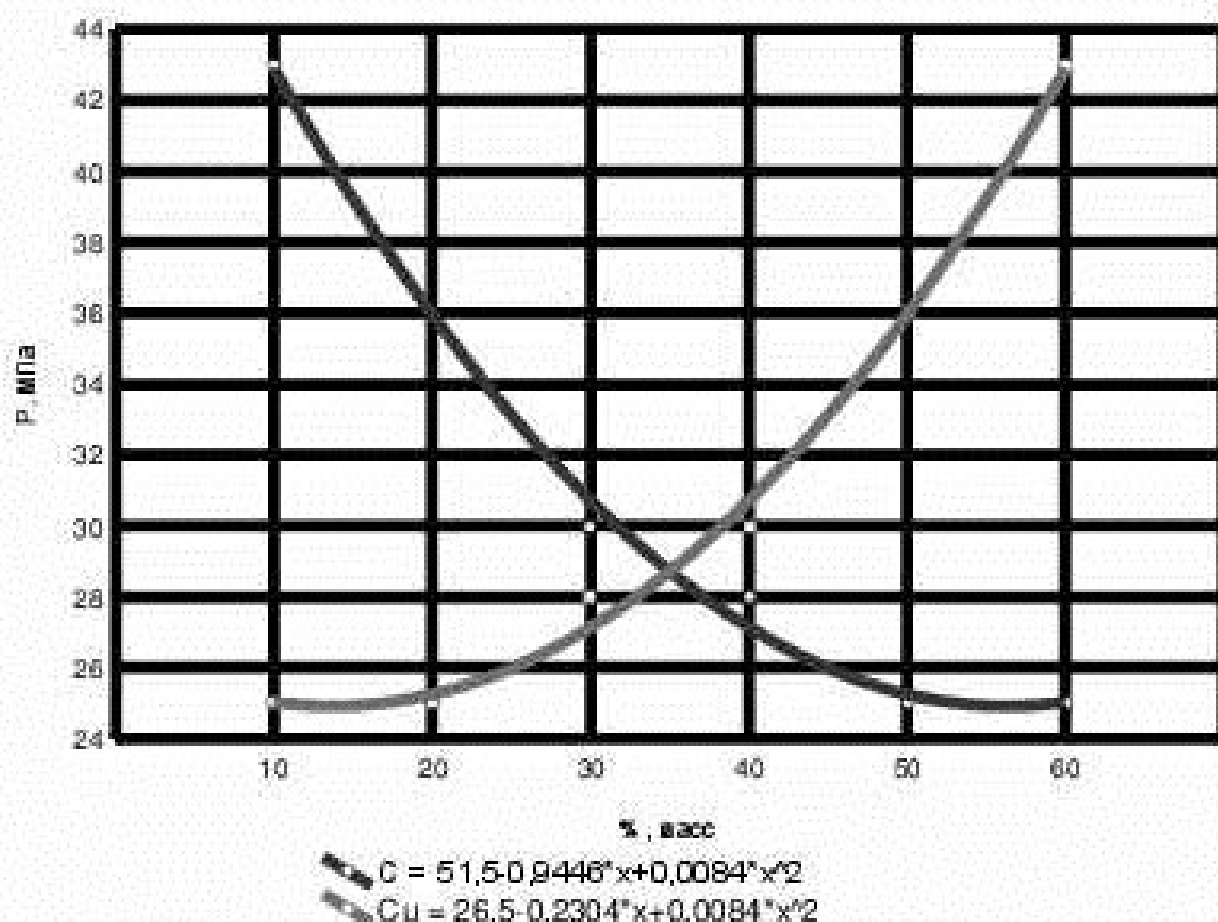
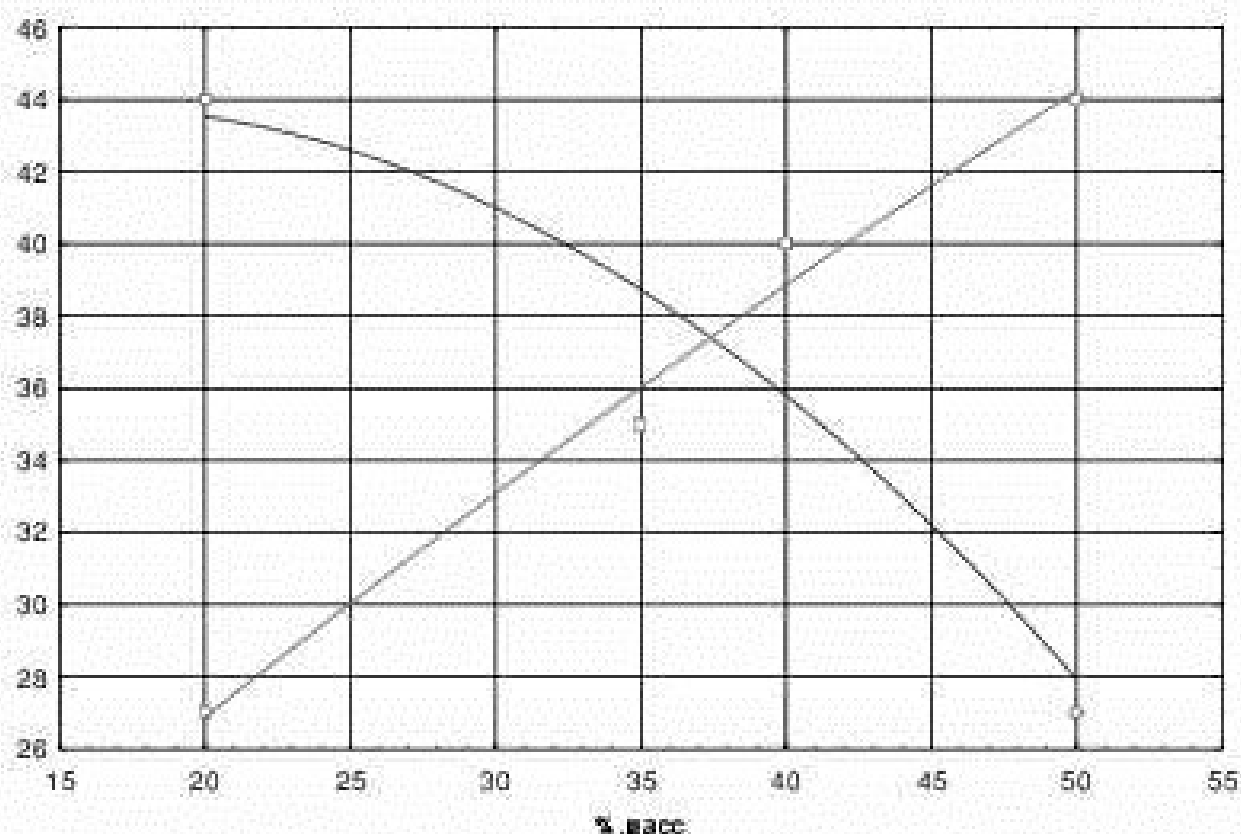


Рисунок 4.9 – Зависимость прочности от процентного соотношения наполнителей с серным связующим в композиции S-C-Cu.

Прочность проходит максимума 43 МПа при процентном содержании графита (C) – 10 %, меди (Cu) – 60%, в этой системе сера (S) остается постоянной – 30%.

Таблица 4.4 – Результаты исследования композиции (S+C+ ДМ)

Система 4			
S, % масс.	C, % масс.	ДМ, % масс.	Р, МПа
30	50	20	27
30	35	35	35
30	30	40	40
30	20	50	44



$$C = 40,6 + 0,4133 \cdot x + 0,0133 \cdot x^2$$

$$DM = 13,2887 + 0,7193 \cdot x + 0,002 \cdot x^2$$

Рисунок 4.10 – Зависимость прочности от процентного соотношения наполнителей с серным связующим в композиции S-C-ДМ

Прочность проходит максимума 44 МПа при процентном содержании графита (C) – 20 %, древесной муки (ДМ) – 50%, в этой системе сера (S) остается постоянной – 30%.

4.3 Регистрация и определение взаимосвязи тепловых характеристик с параметрами износостойкости опытных образцов

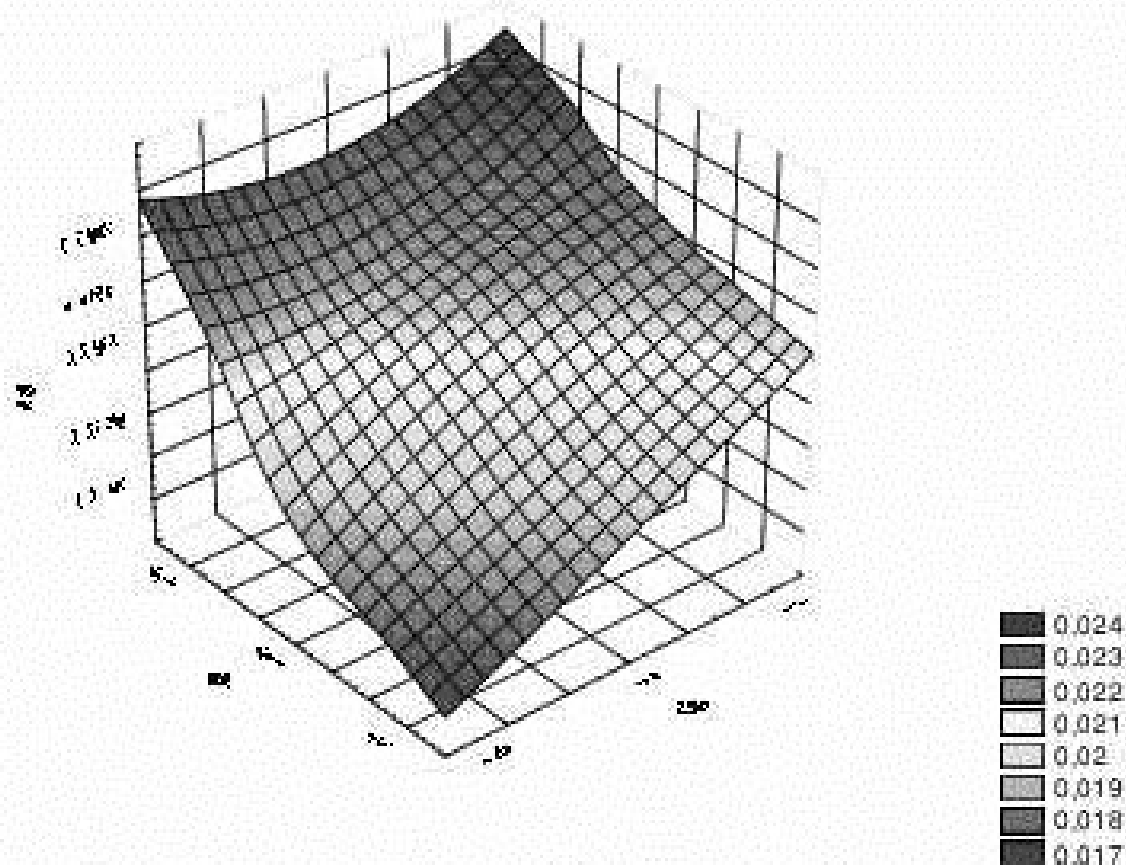
Согласно с разработанной методикой экспериментальных исследований на износостойкость проводились экспериментальные исследования, которые позволяют определять закономерность изнашивания, в том числе температурный режим при трении с выжиганием композиционного материала.

4.3.1 Исследования влияния нагрузки и продолжительности на массовый износ

По ходу испытаний на изнашивание при трении композиционных материалов были получены зависимости, показывающие массовый износ образцов от продолжительности по времени их испытаний в условиях трения скольжения без смазки при различных нагрузках. Задаваемая модель: $y_1 = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_1 \cdot x_2 + b_4 \cdot x_1^{**2} + b_5 \cdot x_2^{**2}$

Таблица 4.5 – Результаты испытаний на износ

Износ, г (y_1)	Нагрузка МПа (x_1)	Продолжительность, мин (x_2)
0,0177	0,5	60
0,0192	0,5	120
0,0225	0,5	180
0,0193	1	60
0,0210	1	120
0,0223	1	180
0,0210	1,5	60
0,0221	1,5	120
0,0235	1,5	180



(y_1) – износ, г; (x_1) – нагрузка, МПа; (x_2) – продолжительность, мин.

Рисунок 4.11 – График зависимости износа от времени и продолжительности испытаний

Корреляционно-регрессионная модель износа композиционного материала

$$y_1 = (-11,82) + 7,77563 \cdot x_1 + 12,1152 \cdot 0,977027 + (-7,9571) \cdot x_1 \cdot 0,977027 + (0,533e-3) \cdot x_1^{**2} + (0,118e-6) \cdot x_2^{**2}.$$

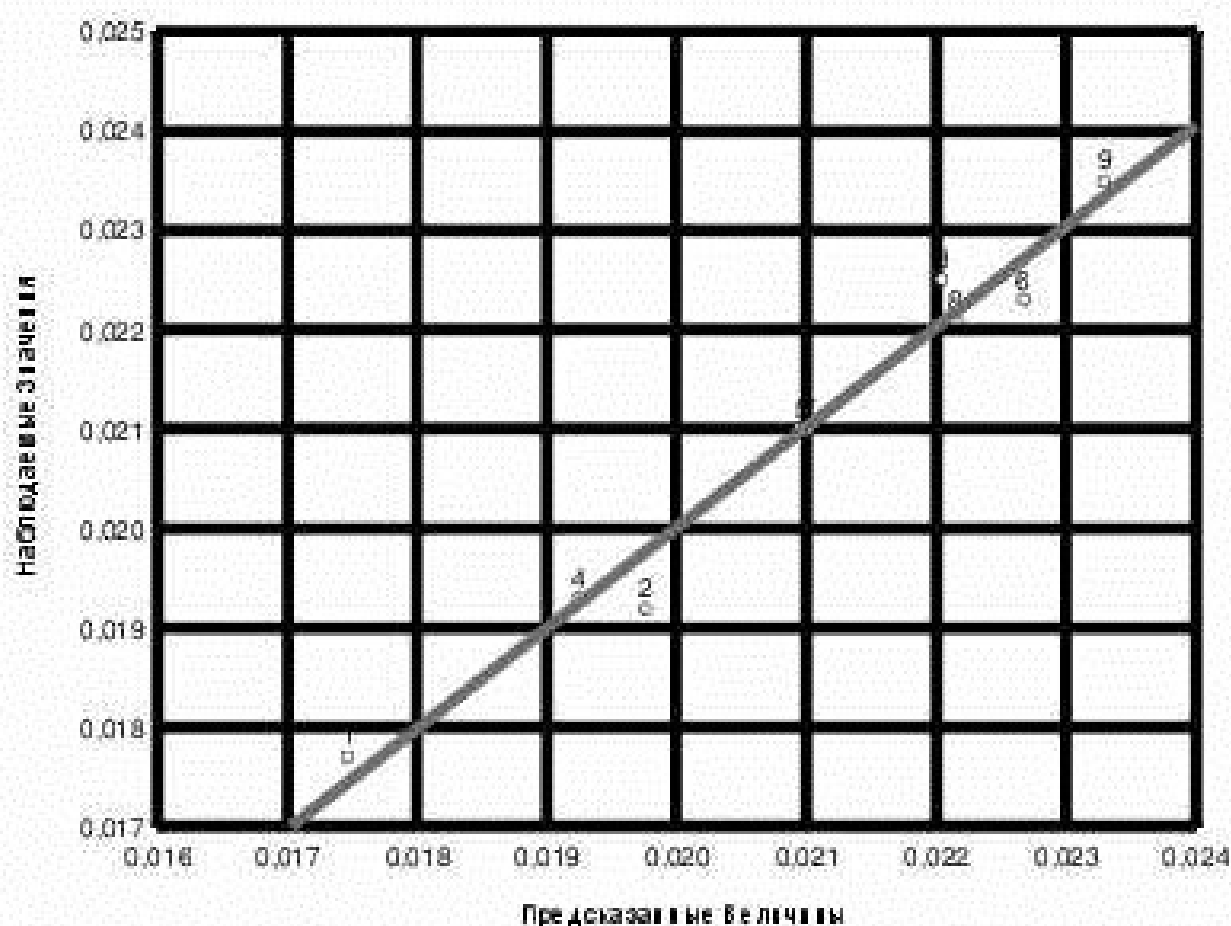


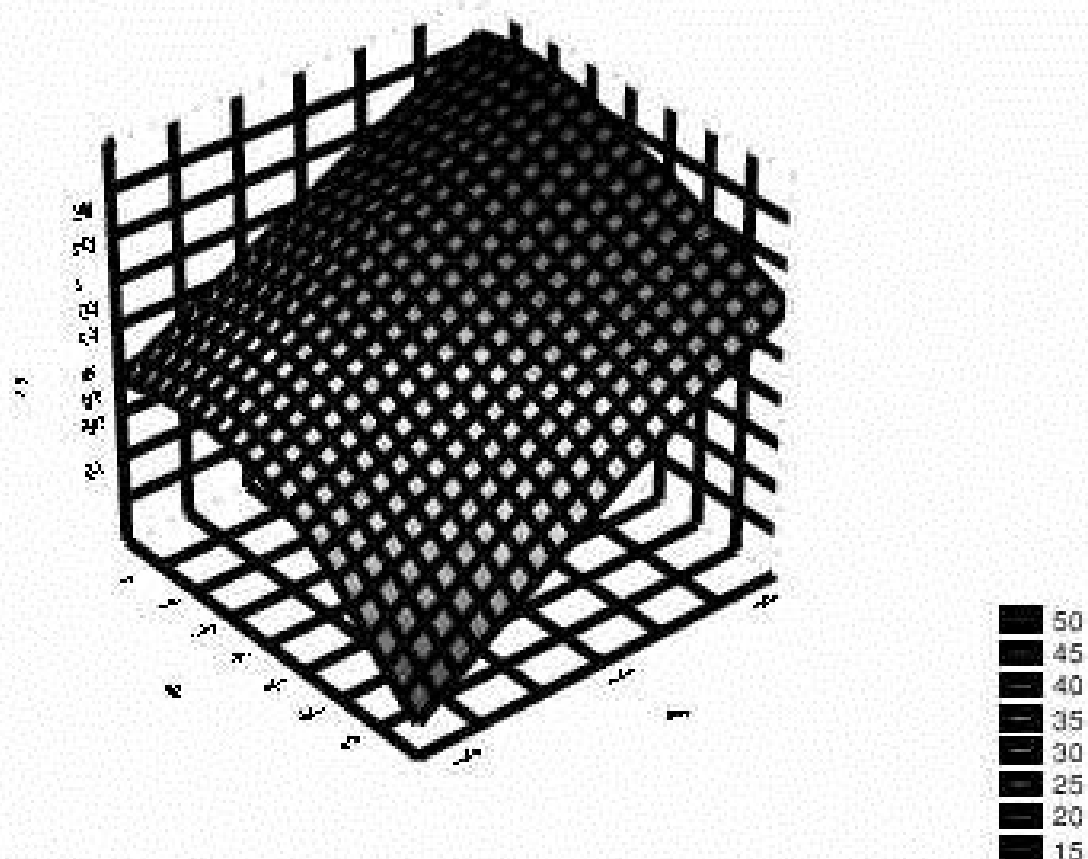
Рисунок 4.12 - График сходимости предсказанных и наблюдаемых значений износа

4.3.2 Исследования влияния нагрузки и продолжительности на температуру нагрева

Таблица 4.6 – Температура нагрева при испытании на износ

Температура нагрева, °C (y_1)	Нагрузка, МПа, (x_1)	Продолжительность, мин, (x_2)
20	0,5	0
25	0,5	10
28	0,5	20
31	0,5	30
32	0,5	40
32,5	0,5	50
32	0,5	60
32	0,5	70
33	1	10
35	1	20
38	1	30
40	1	40
42	1	50

41	1	60
41	1	70
43	1,5	10
45	1,5	20
46	1,5	30
49	1,5	40
50	1,5	50
50	1,5	60
50	1,5	70
55	2	10
58	2	20
60	2	30
65	2	40
70	2	50
75	2	60
75	2	70



(y_1) – Температура нагрева подшипника, °С; (x_1) – нагрузка, МПа; (x_2) – продолжительность, мин.

Рисунок 4.13 – График зависимости температуры нагрева подшипника от времени и продолжительности испытаний

Корреляционно-регрессионная модель нагрева композиционного материала при испытании на износ:

$$y1=0,344466)+47,6041*x1+(-11,776)*(-1,3576)+23,1217*x1*(-1,3576)+0,714282*x1**2+0,002013)*x2**2$$

$$\text{Функция остатков: } y = (a - b)^2$$

где: a – наблюдаемое значение зависимой переменной,

b – предсказанное значение зависимой переменной.

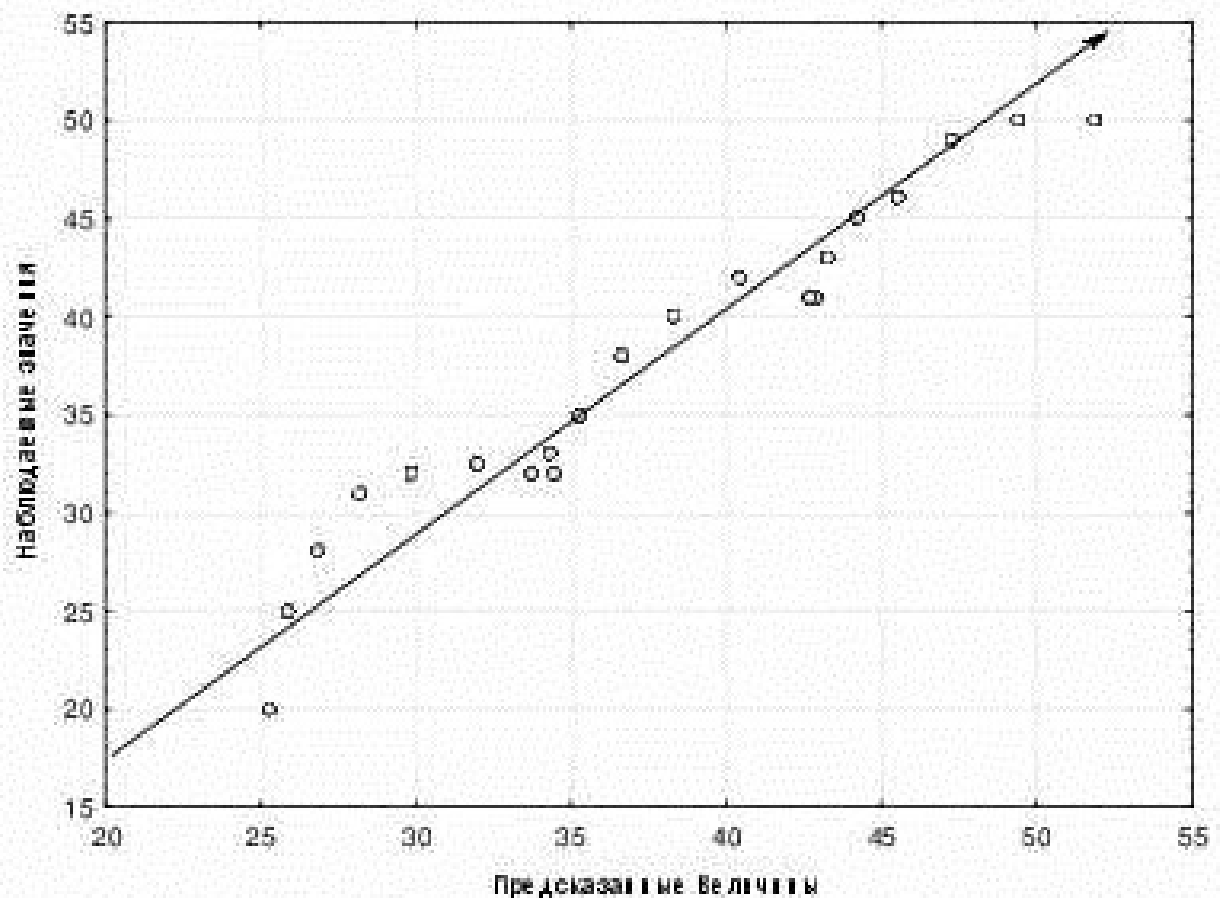


Рисунок 4.14 - График сходимости предсказанных и наблюдаемых значений температуры

На основании проведенных расчетов при различных условиях испытаний получены графики зависимости температуры нагрева и величины износа подшипника скольжения в зависимости от нагрузки и времени испытаний.

В выбранных пределах варьирования факторов оптимальным режимом может быть выбран режим при нагрузке до 1,5 МПа и времени испытаний до 180 минут износ составляет 0,0235, температура нагрева 50-75°C.

4.4 Разработка технологии изготовления подшипников скольжения. Техничко-экономическая оценка

4.4.1 Разработка технологического процесса изготовления подшипников скольжения

В качестве объектов восстановления и изготовления выбраны подшипники клавишного механизма соломотряса комбайна Енисей 1200.

Для этого комбайна изготавливались вкладыши для подшипников скольжения коленчатого вала клавишного механизма соломотряса. Объект был выбран вследствие выявленной проблемы износа коленчатого вала серийными вкладышами из металлокерамического материала. Износ вала объясняется тем, что: 1 – металлокерамический вкладыш по твердости превышает твердости вала, 2 – вкладыши смазывают консистентными смазками во время сборки и смазка загрязняется. В связи с этим была поставлена задача разработать подшипниковые материалы обеспечивающее низкий коэффициент трения скольжения при работе без смазки.

Материал для создания вкладыша выбирался с учетом обеспечения физико-механических свойств в заданных эксплуатационных режимах и экономической эффективности при их восстановлении.

Состав был выбран S-C-ДМ прочность на сжатие которого составляет 45 МПа, процентные содержания каждого из компонентов следующее графит чешуйчатый природного происхождения (С) – 20 %, древесная мука (ДМ) – 50%, сера комовая газовая ГОСТ 127.5-93 (S) – 30%.

Технологический процесс изготовления включает следующие операции:

1. Подготовка состава.

- измельчение порошков до размера 0,2 мм каждый компонент по отдельности в шаровой мельнице барабанного типа скорость вращения барабана 40 мин⁻¹;
- калибрование просеиванием через вибросито 0,2 мм;
- дозирование в массовых % от общего объема необходимого для изготовления 32 вкладышей;
- перемешивание в шаровой мельнице барабанного типа скорость вращения барабана 40 мин⁻¹, перемешивание происходит всех компонентов одновременно для механической активации компонентов.

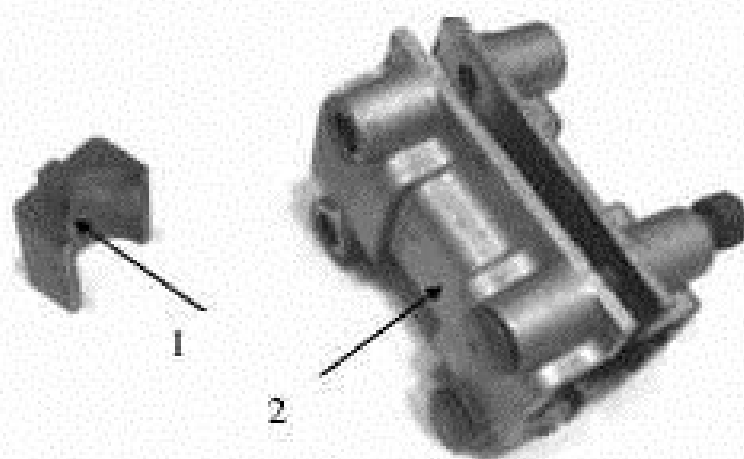
2. Прессование в холодном виде в специальных пресс-формах под давлением 75 МПа в гидропрессе.

3. Спекание в печи при температуре 125°C.

4. Прессование в горячем виде под давлением – 75 МПа.

5. Распалубка форм и подгонка необходимого размера.

Общий вид разработанного подшипника скольжения представлен на рисунке 4.15.



1- вкладыш из серографитового композиционного материала, 2 – корпус подшипника

Рисунок 4.15 – Общий вид испытываемого подшипникового узла со серографитовым вкладышем

Эксплуатационные испытания, проведенные в хозяйстве ООО «Калмузино», подтверждают увеличение ресурса подшипников, восстановленных и изготовленных по разработанным технологическим

процессам, относительно серийных сборочных единиц