

На правах рукописи

Кильдеев Тимур Анверович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ
СОЕДИНЕНИЯ «ВАЛ – ПОДШИПНИК» В ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛАХ
МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИЦИЙ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Кононенко Александр Сергеевич,**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Баурова Наталья Ивановна,**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«МАДИ», декан факультета дорожных и
технологических машин, профессор кафедры
«Производство и ремонт автомобилей и
дорожных машин»

Ли Роман Иннокентьевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный
технический университет», заведующий кафедрой
«Транспортные средства и техносферная
безопасность»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агротехнический инженерный центр ВИМ»

Защита состоится «___» _____ 2024 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: 8 (499) 263-66-33 доб. 36-28

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.331.02,
кандидат технических наук, доцент

А.В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена современными тенденциями к повышению долговечности металлообрабатывающего оборудования. Шпиндель – важнейшая часть станка, которая с увеличением срока его службы нуждается в регулярном техническом обслуживании по причине износа подшипниковых узлов, связанного с фреттинг-износом посадочных поверхностей вала. Фреттинг-износ приводит к тому, что окисленные частицы действуют как абразив, ускоряя процесс изнашивания, кольца подшипников неравномерно прилегают к посадочным поверхностям, что неблагоприятно влияет на распределение нагрузки в подшипнике. Данная техническая проблема приводит в свою очередь к увеличению последующих финансовых затрат на техническое обслуживание и ремонт, стоимость которого может достигать 10 % от стоимости станка. В условиях санкций имеют место и тенденции к осложнениям, связанным с поставками оригинальных комплектующих и узлов для импортных станков, с переходом от крупно-узлового ремонта к восстановительному из-за рисков разрыва цепочек поставок запасных частей, с увеличением степени износа основных производственных фондов в промышленности. Одним из перспективных путей решения проблемы является применение технологии сборки соединения «вал – подшипник» при помощи полимерных нанокомпозиций, которая позволит предотвратить фреттинг-износ посадочных поверхностей вала и, как следствие, обеспечить повышение долговечности соединения. Применение технологии целесообразно как при изготовлении нового узла с целью профилактики развития фреттинг-износа, так и при ремонте изношенного. Технология является универсальной, она доступна для обученного слесаря механосборочных работ и не требует дорогостоящего оборудования. В этой связи работа, посвященная исследованию и разработке технологии сборки соединения «вал – подшипник» полимерными нанокомпозициями в шпиндельных узлах металорежущих станков, является весьма актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Над решением проблемы повышения долговечности и точности металорежущих станков работали А.С. Васильев, А.М. Дальский, В.М. Утенков, В.С. Хомяков, Г.Н. Васильев, С.А. Ефанов и другие ученые. Улучшению свойств полимерных материалов и совершенствованию технологий их применения посвящены труды Н.И. Бауровой, Г.В. Козлова, А.С. Кононенко, В.В. Курчаткина, А.В. Котина, Р.И. Ли, Д.Н. Псарева, А.Н. Быкони, А.А. Колесникова, Д.В. Машина и других ученых. Однако в работах этих специалистов не были детально рассмотрены вопросы сборки шпиндельных узлов металорежущих станков с использованием полимерных материалов.

Целью работы является повышение долговечности соединений «вал – подшипник» в шпиндельных узлах металлообрабатывающих станков в результате применения технологии их сборки с использованием полимерных нанокомпозиций.

Задачи исследований:

1. Разработать математическую модель, определяющую жесткость подшипниковой опоры в зависимости от нагрузок, геометрических и физико-механических характеристик полимерной прослойки.

2. Исследовать адгезионную прочность и упруго-деформационные свойства нанокомпозиций, используемых для сборки подшипниковых опор шпиндельных узлов металлообрабатывающего оборудования, и определить оптимальный

состав нанокомпозиций, имеющих максимальные модуль упругости и адгезионную прочность.

3. Исследовать радиальную жесткость соединений «вал – подшипник», собранных с использованием полимерных нанокомпозиций, с целью проверки математической модели.

4. Экспериментально определить эксплуатационные и механические характеристики разработанных нанокомпозиций.

5. Исследовать структуру полимерных нанокомпозиций с целью анализа причин влияния нанонаполнителей на свойства исходных составов.

6. Провести стендовые испытания на долговечность шпиндельных узлов с тонкими прослойками из полимерных нанокомпозиций между валом и внутренними кольцами подшипников.

7. Разработать технологию сборки соединения «вал – подшипник» с использованием полимерных нанокомпозиций в шпиндельных узлах металлообрабатывающих станков.

8. Внедрить предложенную технологию на профильных промышленных предприятиях и оценить ее экономическую эффективность.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель, описывающая жесткость подшипниковой опоры в зависимости от нагрузок, геометрических и физико-механических характеристик полимерной прослойки.

2. Математически обоснована и экспериментально подтверждена зависимость жесткости соединения «вал – подшипник» от модуля упругости полимерной основы и физико-механических свойств нанонаполнителя.

Практическая значимость:

1. Определен оптимальный состав полимерной нанокомпозиции на основе анаэробного герметика, обладающий улучшенными прочностными, технологическими и эксплуатационными характеристиками.

2. Разработана технология сборки соединений «вал – подшипник» с использованием полимерных нанокомпозиций, обеспечивающая повышение долговечности шпиндельных узлов металлообрабатывающих станков.

3. Разработаны практические рекомендации и компьютерная программа для обоснованного применения технологии сборки соединений «вал – подшипник» с использованием полимерных нанокомпозиций в зависимости от конструктивных особенностей узлов.

Разработанная технология апробирована и внедрена на АО «МПП имени В.В. Чернышева», АО «Российские космические системы» и АО «Протон-ПМ», а также рекомендована Бюро Центрального Совета ООО «СоюзМаш России» к внедрению на предприятии АО «Трансмашхолдинг», что подтверждено соответствующими актами.

Методы исследований. Поставленные задачи были решены с помощью теоретических и экспериментальных методов исследований, а также компьютерного моделирования. Экспериментальные исследования осуществлялись с применением следующего оборудования: лабораторные аналитические весы ВЛ-124, ультразвуковая ванна GRAD 0.5 Home Style, координатно-измерительная машина с ЧПУ CRYSTA-APEX S574, гидравлическая разрывная машина INSTRON 600DX, установка для определения стойкости покрытий к

контактному износу по ГОСТ 23.211-80, профилограф-профилометр SJ-210, вибростенд инерционного действия на базе эксцентрикового вибратора ИВ-107, установка для исследования теплопроводности полимерных материалов, установка для проведения стендовых испытаний подшипниковых узлов, сушильно-стерилизационный шкаф ШСС-80п, сканирующий зондовый микроскоп Solver NEXT. Для решения задачи компьютерного моделирования использовалась программная среда Autodesk с возможностью проведения исследований напряженно-деформированного состояния модели методом конечных элементов.

Соответствие паспорту научной специальности. Область исследования соответствует пунктам паспорта специальности 2.5.6. «Технология машиностроения»: п. 3. «Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения»; п. 4. «Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска»; п. 7. «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин».

Положения, выносимые на защиту:

1. Полученная математическая модель устанавливает степенную зависимость жесткости подшипниковой опоры от толщины прослойки и модуля упругости полимерной нанокомпозиции, нанесенной между валом и внутренним кольцом подшипника.

2. Жесткость соединения «вал – подшипник» зависит от модуля упругости полимерной основы и физико-механических свойств нанонаполнителя.

Достоверность и обоснованность положений и выводов, представленных в работе, подтверждается достаточной сходимостью результатов теоретических расчетов, основанных на положениях технологии машиностроения и теории упругости, и экспериментальных исследований. Достоверность результатов экспериментов, обработанных с использованием современных методов статистического анализа данных, подтверждается достаточной повторяемостью полученных значений физико-механических и эксплуатационных характеристик нанокомпозиций, а также результатами стендовых испытаний и производственного внедрения технологии сборки соединений «вал–подшипник».

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры технологии обработки материалов МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2020–2023); на 15-й Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении» (Москва, 2023); на Международной конференции «Моделирование в инженерном деле» (Москва, 2023); на IV Международной научно-технической конференции «Современные достижения в области клеев и герметиков: материалы, сырье, технологии» (Н. Новгород, 2023), на 6-й Международной конференции по Интеллектуальным вычислениям и оптимизации (Хуахин, Таиланд, 2023) – 6th International Conference on Intelligent Computing & Optimization 2023 (Hua Hin, Thailand, 2023); на Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии, оборудование и материалы заготовительных производств в машиностроении» (Москва, 2022); на Международной научно-практической конференции «Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте» (Липецк, 2022); на XII Национальной научно-технической

конференции, проводимой под эгидой Союза машиностроителей России (Москва, 2022); на конкурсе 2022 года на присуждение премии Мэра г. Москвы «Новатор Москвы» по направлению «Промышленность» (Москва, 2022); на Все-российском конкурсе научно-исследовательских работ в области инженерных и гуманитарных наук, посвященном 60-летию полета Ю.А. Гагарина в космос в номинации «Технология машиностроения» (Москва, 2021).

Публикации. По результатам выполненной работы опубликованы 11 печатных работ, в том числе сделаны 2 публикации в изданиях, включенных в систему цитирования Scopus, 6 публикаций в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки, из них один патент на изобретение. Общий объем публикаций составляет 7,81 п.л., автору принадлежит 3,47 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертации составляют 174 страницы машинописного текста, в том числе 145 страниц основного текста, 61 рисунок и 17 таблиц. Диссертация содержит библиографию из 201 наименования, среди которых 40 зарубежных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, дана общая характеристика проблемы, показаны научная новизна, практическая значимость результатов исследований и сформулированы основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В Главе 1 проведен анализ факторов, приводящих к снижению долговечности соединений «вал – подшипник» шпиндельных узлов металлообрабатывающих станков, который показал, что вследствие фреттинг-износа (Рисунок 1) фактическая площадь контакта сопрягаемых поверхностей составляет менее 35% от общей площади соединения, что неблагоприятно влияет на распределение нагрузки в подшипниках.

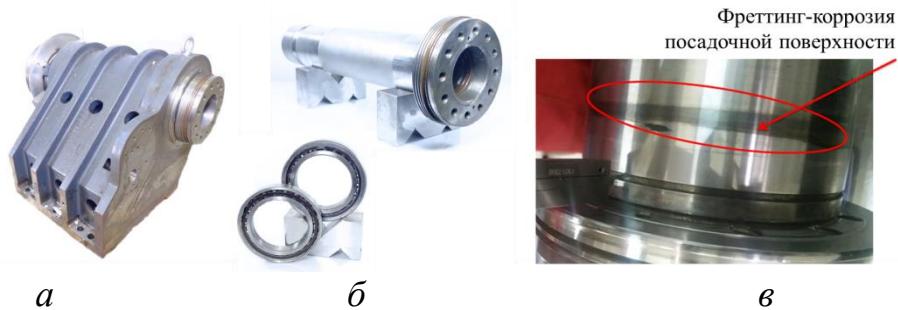


Рисунок 1.

Элементы шпиндельного узла токарного станка СТХ 510 ecoline и выявленный дефект посадочной поверхности вала:

- а* – шпиндельный узел в сборе; *б* – вал и подшипники;
- в* – фреттинг-коррозия на посадочной поверхности вала

К эффективным способам защиты посадочных шеек шпинделей от фреттинг-износа можно отнести использование полимерных материалов как при изготовлении нового узла, так и в случае ремонта. При этом отсутствие методик расчета жесткости соединений «вал –подшипник», собранных с использованием

полимерных нанокомпозиций, является фактором, ограничивающим широкое применение технологии в производстве.

Предпочтительными полимерными материалами для сборки соединений «вал – подшипник» являются анаэробные составы, способные полимеризоваться в малых зазорах до 0,01 мм. Анализ условий сборки и эксплуатации шпиндельных узлов позволил определить основные требования к анаэробным составам: время схватывания анаэробной нанокомпозиции в зазоре должно составлять не менее 10 мин, время полного отверждения – не более 24 ч. При увеличении температуры от 20 до 70 °С полимерная прослойка должна сохранять прочность на уровне не менее 95 % от исходного значения. Долговечность полимерных прослоек определяется их стойкостью к старению, контактному износу, воздействию вибрационных нагрузок, а также их теплопроводностью, адгезионными и упруго-деформационными свойствами. Используя нанонаполнители, можно получить совершенно новые полимерные материалы, отличающиеся высокой долговечностью и улучшенными относительно исходных полимеров характеристиками. С учетом условий применения составов было определено основное требование к нанонаполнителям: возможность повышения модуля упругости составов при недопущении их преждевременной полимеризации во время сборки узла.

В данной главе также поставлена цель и сформулированы задачи исследований.

В Главе 2 изложены теоретические основы применения нанонаполненных полимеров для повышения долговечности подшипниковых опор шпиндельных узлов металлообрабатывающего оборудования.

Сутью задачи является определение для передней опоры радиального смещения $\Delta_{\text{ппш}}$ оси вала относительно центра посадочного отверстия корпуса, если между валом и внутренними кольцами подшипника имеется зазор, заполненный слоем полимера.

При постановке задачи был рассмотрен ряд следующих случаев.

В первом случае вал установлен в посадочных отверстиях подшипников без зазора, к нему приложена некоторая радиальная нагрузка P , от которой в передней опоре возникает радиальная реакция $F_r = P$. Радиальное смещение оси вала относительно центра посадочного отверстия корпуса известно и равно Δ_0 .

В другом случае вал установлен в подшипниковых опорах с зазором, который заполнен полимером, т. е. толщина слоя полимера равна зазору. Для передней опоры толщину слоя полимера будем считать малой по сравнению с толщиной вала и равной h . Модуль упругости полимера принимаем равным E_p .

Для случая, когда вал установлен в подшипниковых опорах с зазором, заполненным слоем полимера, введем допущение, что общее смещение в подшипниковом узле $\Delta_{\text{ппш}}$ является суммой деформаций подшипника Δ_0 и полимерной прослойки y от приложенной нагрузки:

$$\Delta_{\text{ппш}} = \Delta_0 + y. \quad (1)$$

Подшипники качения имеют прогрессивный коэффициент жесткости. Значение деформации подшипника в радиальном направлении, мкм, может быть вычислено с помощью уравнения

$$\Delta_0 = \frac{1}{c_s} F_r^{0.84} + \frac{s}{2}, \quad (2)$$

где F_r – радиальная нагрузка на подшипник, Н; s – радиальный зазор в подшипнике, мкм; c_s – коэффициент жесткости, определяемый по формуле

$$c_s = K_c d^{0,65} \quad (3)$$

Здесь K_c – вспомогательный коэффициент для расчета коэффициента жесткости; d – внутренний диаметр подшипника, мм.

Предположим, что слой полимера достаточно толстый, т. е. возникающие прогибы малы по сравнению с толщиной полимерной прослойки, которая работает в пределах упругости. Шероховатость сопрягаемых поверхностей значительно меньше толщины промежуточного полимерного слоя. Рассмотрим полимерную прослойку как упругое основание, а внутреннее кольцо подшипника – как балку, лежащую на упругом основании (Рисунок 2).

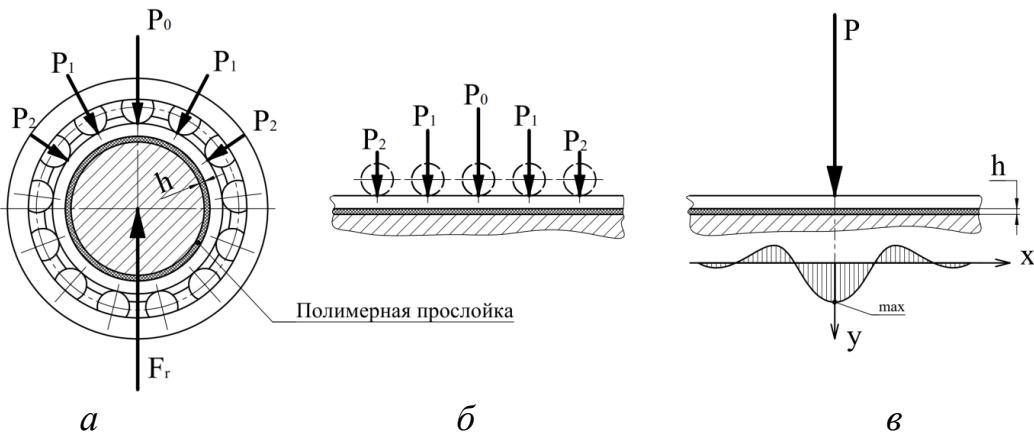


Рисунок 2.

Описание взаимодействия полимерного слоя с валом и внутренним кольцом подшипника:

а – подшипник под нагрузкой; *б* – балка на упругом основании под действием нагрузки, распределенной между телами качения; *в* – балка на упругом основании под действием сосредоточенной силы

Под действием сосредоточенной силы P балка на упругом основании деформируется. Деформация балки описана формулой, предложенной В.В. Курчаткиным:

$$y = \frac{P}{8E_{\text{пп}}J\beta^3} e^{-\beta x} (\sin \beta x + \cos \beta x), \quad (4)$$

где P – результирующая нагрузка, Н; $E_{\text{пп}}$ – модуль упругости материала подшипника, Н/мм²; J – момент инерции поперечного сечения балки (внутреннего кольца подшипника), мм⁴; β – коэффициент, определяемый по формуле

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4E_{\text{пп}}J}}. \quad (5)$$

Здесь $k = k_{\text{п}} b$ – коэффициент постели; $k_{\text{п}}$ – коэффициент податливости композиции, Н/мм³; b – ширина внутреннего кольца подшипника, мм.

Коэффициент податливости определяется по формуле Винклера:

$$k_{\text{п}} = \frac{p}{S}, \quad (6)$$

где p – давление на поверхности упругого основания, Па; S – прогиб (полная осадка) сжимаемого упругого основания, мм.

Прогиб полимерного покрытия под давлением p рассчитан по формуле (7), описанной в работе Д.В. Машина:

$$S = \frac{p (1+\mu_{\text{HK}}) (1-2\mu_{\text{HK}}) h}{(1-\mu_{\text{HK}}) E_{\text{HK}}}, \quad (7)$$

где $\mu_{\text{нк}}$ и $E_{\text{нк}}$ – осредненные коэффициент Пуассона и модуль упругости материала нанокомпозиции в пределах толщины прослойки h соответственно.

Подставив формулу (7) в (6), получили

$$k_{\text{п}} = \frac{(1-\mu_{\text{нк}}) E_{\text{нк}}}{(1+\mu_{\text{нк}})(1-2\mu_{\text{нк}}) h}. \quad (8)$$

Тогда коэффициент β , вычисляемый по формуле (5),

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{(1-\mu_{\text{нк}}) E_{\text{нк}} b}{4E_{\text{пш}} J (1+\mu_{\text{нк}})(1-2\mu_{\text{нк}}) h}}. \quad (9)$$

С целью определения доли наполнителя использована формула Коунто

$$\frac{E_{\text{нк}}}{E_{\text{п}}} = (1 - \varphi_{\text{н}}^{1/2}) + \frac{E_{\text{н}}}{\frac{(1-\varphi_{\text{н}}^{1/2})}{\varphi_{\text{н}}^{1/2}} E_{\text{п}} + E_{\text{н}}}, \quad (10)$$

где $E_{\text{нк}}$, $E_{\text{п}}$, и $E_{\text{н}}$ – модули упругости композиции, ненаполненного полимера и наполнителя соответственно, МПа; $\varphi_{\text{н}}$ – объемная доля наполнителя.

После преобразования формул получена совокупность зависимостей, описывающая влияние физико-механических свойств и толщины полимерной прослойки в соединении «вал – подшипник» на жесткость подшипниковой опоры:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta_{\text{пш}} = \Delta_0 + \frac{P}{8E_{\text{пш}}J\beta^3} e^{-\beta x} (\sin \beta x + \cos \beta x); \\ \beta = \sqrt[4]{\frac{(1-\mu_{\text{нк}}) E_{\text{п}} \left((1-\varphi_{\text{н}}^{1/2}) + \frac{E_{\text{н}}}{\frac{(1-\varphi_{\text{н}}^{1/2})}{\varphi_{\text{н}}^{1/2}} E_{\text{п}} + E_{\text{н}}} \right) b}{4E_{\text{пш}} J (1+\mu_{\text{п}})(1-2\mu_{\text{п}}) h}}, \end{array} \right. \quad (11)$$

где Δ_0 – радиальное смещение оси вала относительно центра посадочного отверстия корпуса известно и равно табличному значению, установленному производителем подшипника; b – ширина внутреннего кольца подшипника, мм; $\mu_{\text{п}} \approx \mu_{\text{нк}}$ – коэффициент Пуассона материала исходного полимера, который с достаточной достоверностью можно считать примерно равным коэффициенту Пуассона наполненной композиции; h – толщина полимерной прослойки, мм.

Приняв, что P – результирующая нагрузка, приложенная к кольцу подшипника в точке касания его центральным телом качения, где $x = 0$, а модуль упругости нанокомпозиции известен и равен $E_{\text{нк}}$, указанную совокупность (11) можно представить в виде

$$\Delta_{\text{пш}} = \Delta_0 + \frac{P}{8E_{\text{пш}}J} \sqrt[4]{\left(\frac{4E_{\text{пш}}J (1+\mu_{\text{п}})(1-2\mu_{\text{п}}) h}{(1-\mu_{\text{п}}) E_{\text{нк}} b} \right)^3}. \quad (12)$$

Отношение деформаций полимерной прослойки при различной ее толщине и при различных модулях упругости композиций путем математических преобразований формул (4), (5) и (9) может быть представлено в виде

$$\frac{y_1}{y_2} = \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right)^3 = \left(\frac{(1-\mu_{\text{п2}}) E_{\text{п2}} (1+\mu_{\text{п1}})(1-2\mu_{\text{п1}}) h_1}{(1-\mu_{\text{п1}}) E_{\text{п1}} (1+\mu_{\text{п2}})(1-2\mu_{\text{п2}}) h_2} \right)^{\frac{3}{4}}, \quad (13)$$

где $E_{\text{п2}}$ и $E_{\text{п1}}$ – модули упругости композиций, Н/мм²; h_2 и h_1 – толщина полимерных прослоек, мм; $\mu_{\text{п2}}$ и $\mu_{\text{п1}}$ – коэффициенты Пуассона композиций.

С применением формулы (13) на примере передней подшипниковой опоры «дуплекс NSK 7028 A5 TR DU L P3» шпиндельного узла токарного станка с ЧПУ DMG MORI CTX 510 ecoline были получены зависимости поверхности отклика

максимальной деформации полимерной прослойки от значений переменных при неизменных значениях нагрузки (Рисунок 3, *а*) и модуля упругости (Рисунок 3, *б*). С учетом того, что жесткость передней опоры рассматриваемого шпиндельного узла составляет 826 Н/мкм, воздействие на опору радиальной нагрузки 5 кН вызовет в ней смещение, равное 6 мкм. При толщине полимерной прослойки, определяемой предельным износом посадочных поверхностей шпиндельных узлов и равной 0,02 мм, максимальное ее смещение составит 0,2 мкм, что обеспечит требуемую жесткость опоры в целом.

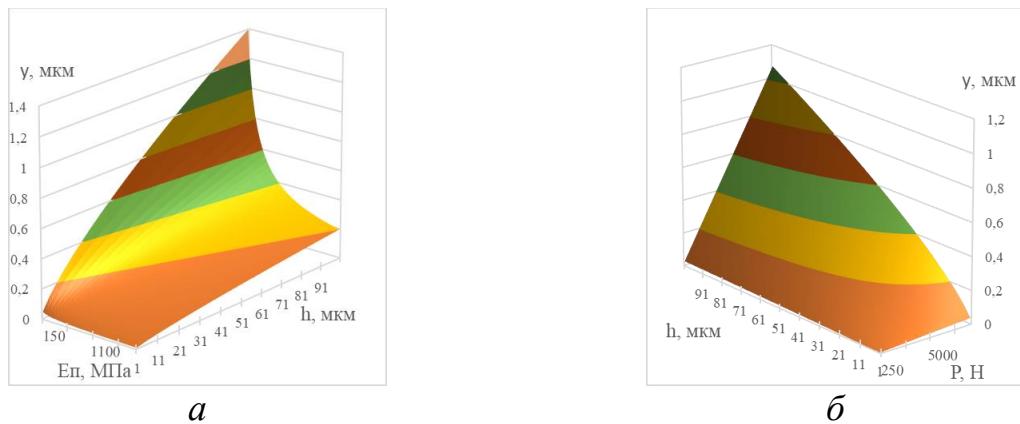


Рисунок 3.

Зависимости поверхности отклика максимальной деформации полимерной прослойки от значений E_p и h при нагрузке 5 кН (*а*) и от значений P и h при модуле упругости полимера 500 МПа (*б*)

Анализ приведенных поверхностей отклика показал, что зависимость деформации прослойки от ее толщины выражается законом, близким к линейному. В то же время увеличение модуля упругости полимерной прослойки приводит к гиперболическому снижению ее деформации при постоянных толщине и приложенной нагрузке.

Для проверки адекватности полученной зависимости (13) с помощью программного обеспечения на базе CAD/CAE-системы Autodesk Inventor было выполнено компьютерное моделирование. Среднее отклонение значений, полученных с помощью математической и компьютерной моделей, в которой подшипниковая опора представлена в виде балки, лежащей на упругом основании, составило 0,4 %. Однако компьютерная модель, в которой подшипник представлен в виде кольца, закрепленного на полимерной прослойке, является более приемлемой с точки зрения промышленного применения, поэтому формулу (12) предложено дополнить уточняющим коэффициентом 1,2.

В Главе 3 изложена общая программа исследований, представлены методики исследований адгезионных и упруго-деформационных свойств, стойкости к старению, фреттинго- и вибростойкости, теплопроводности, наноструктуры анаэробных составов и нанокомпозиций на их основе, а также методика стендовых испытаний подшипниковых узлов, собранных с применением полимерных нанокомпозиций.

При проведении анализа анаэробных герметиков и нанонаполнителей в качестве материалов для исследований были выбраны отечественные анаэробные

составы Анакрол-102, Унигерм-7, Анатерм-112 и зарубежный состав Loctite-601, а также наноразмерные частицы оксида алюминия альфа типа (далее – Al_2O_3), диоксида кремния AEROSIL 380 (далее – AEROSIL 380) и смесь фуллеренов C60/C70 (далее – C60/C70). Расчет по формуле (10) показал, что оптимальная массовая доля Al_2O_3 в полимерной композиции составляет 0,5 %, AEROSIL 380 – 1,15 % и C60/C70 – 0,85 %.

Для полимерного состава, эксплуатируемого в соединении «вал – подшипник», показательной является оценка адгезионной прочности по нормальным (ГОСТ 14760-69) и касательным (ГОСТ 14759-69) напряжениям. Испытания проводились после полной полимеризации образцов на разрывной машине INSTRON 600 DX. Данное оборудование позволяет фиксировать смещение образца от приложенных нагрузок, благодаря чему была проведена оценка модулей упругости исследуемых полимерных материалов. При выполнении исследований были разработаны методика испытаний радиальной жесткости соединений «вал – подшипник», собранных с использованием полимерных нанокомпозиций, и методика испытаний ползучести полимерных материалов. Для контроля деформаций образцов при испытаниях использовалась координатно-измерительная машина с ЧПУ CRYSTA-APEX S574.

Испытания на фреттингстойкость соединений с покрытиями из полимерных материалов проводились согласно требованиям ГОСТ 23.211-80. Для оценки фреттинг-износа с помощью профилографа-профилометра SJ-210 снимали профилограммы в радиальном направлении с восьми равноотстоящих участков рабочей поверхности каждого образца. Испытания на стойкость полимеров к вибрационным нагрузкам проводили на вибростенде инерционного действия на базе эксцентрикового вибратора ИВ-107. Согласно методике, описанной в ГОСТ 14760-69, оценивали адгезионную прочность образцов, извлеченных с вибростенда по истечении 10, 20 и 30 ч после начала испытаний. Исследования полимерных составов на стойкость к старению проводили ускоренным методом по методике, составленной на основе ГОСТ 9.707-81. После завершения 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 и 40 циклов старения образцы испытывали на адгезионную прочность в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 14759-69. Исследования теплопроводности анаэробных составов и нанокомпозиций на их основе проводили методом температурного градиента.

Для исследованияnanoструктуры образцов использовали сканирующий зондовый микроскоп Solver NEXT. Образцами служили прямоугольные пленки из полимеров и нанокомпозиций размером $5,0 \times 5,0$ мм и толщиной 0,2–0,3 мм.

В рамках работы проводили стендовые испытания подшипниковых узлов с нанесенными между валом и внутренними кольцами подшипников прослойками из полимерных нанокомпозиций. Были разработаны экспериментальный стенд на базе электродвигателя АИР 71 В2 1.1/3000 и методика испытаний. Долговечность подшипниковых узлов оценивали по резкому повышению в передней опоре в течение одного часа испытаний температуры до 6 °С и уровня шума до 20 % от первоначального уровня.

В Главе 4 описаны результаты исследований и проведен их анализ.

Исследование прочности герметиков Анакрол-102, Унигерм-7, Анатерм-112, Loctite-601 и нанокомпозиций на их основе с наполнителями Al_2O_3 , AEROSIL 200,

AEROSIL 380 и C60/C70 показало, что адгезионная прочность этих герметиков увеличилась на 14–63 % при оценке по нормальным, и на 41–116 % – по касательным разрушающим напряжениям (Рисунок 4). Наибольшую эффективность продемонстрировали отечественный состав Унигерм-7 и зарубежный состав Loctite-601, которые и были выбраны для дальнейших исследований.

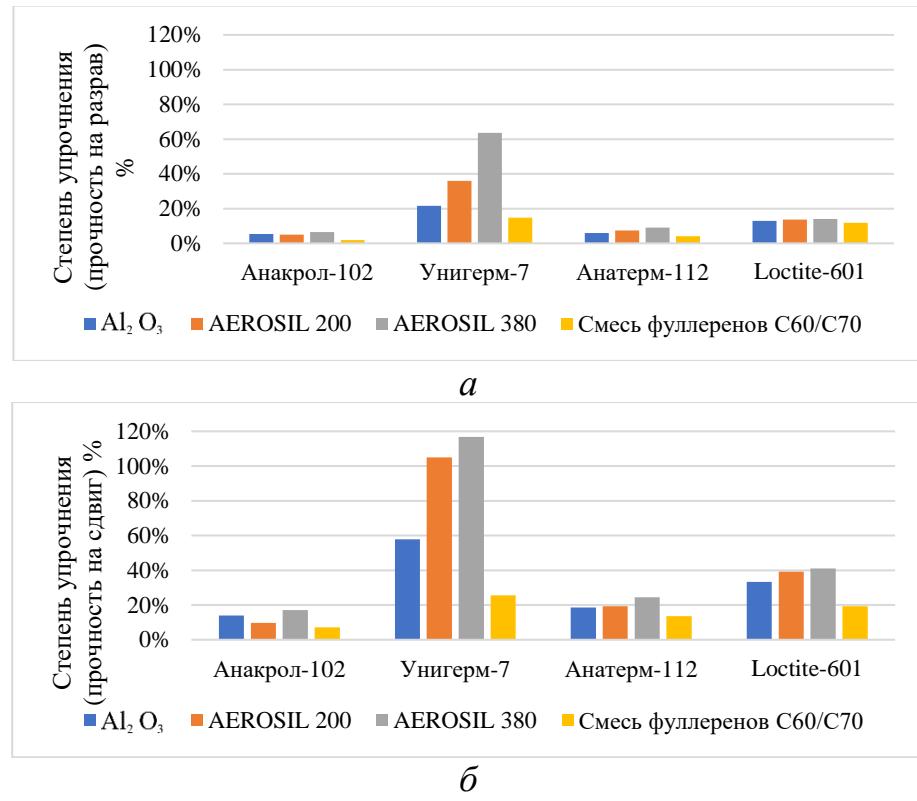


Рисунок 4.

Результаты экспериментов по оценке влияния наполнителей Al_2O_3 , AEROSIL 200, AEROSIL 380 и C60/C70 на относительное упрочнение анаэробных составов Анакрол-102, Унигерм-7, Анатерм-112 и Loctite-601:
 а – испытания на разрыв; б – испытания на сдвиг

Все рассматриваемые нанопорошки обеспечивают стабильное улучшение свойств исходных полимерных составов. Наименьшее влияние оказывает наполнитель C60/C70, который по этой причине исключили из дальнейших исследований. При проведении экспериментов было выявлено, что наполнение анаэробных герметиков нанопорошком оксида алюминия приводит к ускоренной полимеризации смеси, что затрудняет реализацию технологии в производственных условиях. Наиболее эффективно улучшает характеристики исходных составов их модификация нанопорошком AEROSIL 380, который обладает более высокой степенью дисперсности по сравнению с нанопорошком AEROSIL 200. Дополнительная ультразвуковая обработка нанокомпозиции в течение 60 с приводит к увеличению прочности на 7–9 %, при этом дальнейшая обработка не приводит к существенному увеличению прочности. Введение наночастиц в состав анаэробных герметиков обеспечивает рост скорости полимеризации на 50–100 %.

Внедрение нанонаполнителей в состав исходной полимерной матрицы позволяет добиться увеличения модуля упругости анаэробных герметиков на 35–50 %.

При этом модуль упругости нанокомпозиции на основе анаэробного герметика Унигерм-7 с добавлением диоксида кремния AEROSIL 380 на 72 % больше, чем у ненаполненного зарубежного состава Loctite-601, и на 27 % больше, чем у нанокомпозита на его основе. Обработка результатов исследований модуля упругости с помощью программного обеспечения для статистического анализа STATGRAPHICS 19 (Рисунок 5) позволила определить для составов Loctite-601 и Унигерм-7 оптимальные массовые концентрации нанонаполнителей, которые для наночастиц AEROSIL 380 составляют 1,1–1,2 %, а для оксида алюминия – 0,5–0,6 %.

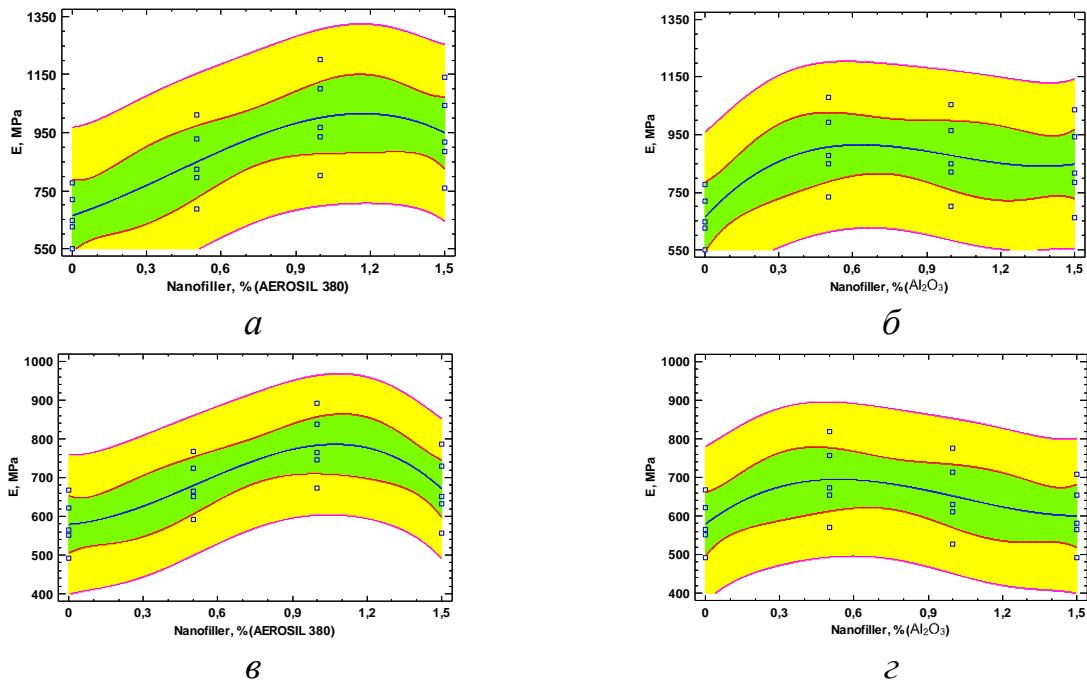


Рисунок 5.

Статистическая обработка результатов исследований модуля упругости с помощью программного обеспечения STATGRAPHICS 19:
a – Унигерм-7 + AEROSIL 380; *б* – Унигерм-7 + Al_2O_3 ;
в – Loctite-601 + AEROSIL 380; *г* – Loctite-601 + Al_2O_3

Для дальнейших исследований из этих двух наполнителей был выбран AEROSIL 380, показавший наибольшую эффективность в отношении улучшения ключевого параметра – модуля упругости. Важным фактором является существенно меньшая рыночная стоимость AEROSIL 380 по сравнению со стоимостью наполнителей Al_2O_3 и C60/C70.

Испытания анаэробных герметиков и нанокомпозиций на их основе с AEROSIL 380 показали, что рост сопротивления ползучести нанокомпозиций составляет 12–30 % относительно этого параметра у исходных составов. Изучение зависимости радиального смещения втулки от приложенной нагрузки для составов Loctite-601, Унигерм-7 и нанокомпозиций на их основе, имеющих разные модули упругости, позволило оценить взаимосвязь между изменением модуля упругости прослойки и ее смещением под действием радиальной нагрузки (Рисунок 6). Радиальное смещение полимерной прослойки Δ пропорционально модулю упругости состава E_p в степени $-0,731$, что соответствует расчетному значению $-0,75$ по формуле (13).

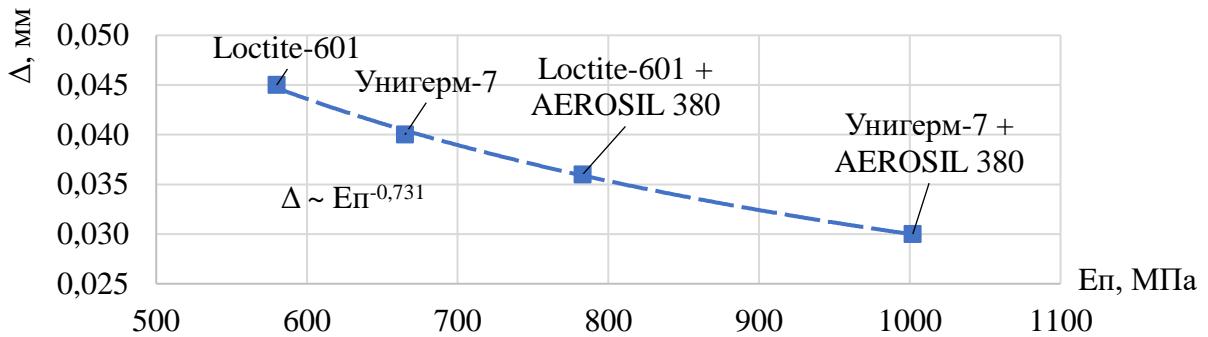


Рисунок 6.

График зависимости значения радиального смещения прослойки Δ от модуля упругости состава E_p при одинаковой радиальной нагрузке 45 кН

Модифицирование анаэробных составов нанопорошком AEROSIL 380 приводит к увеличению коэффициента теплопроводности на 22–82 %, снижению интенсивности контактного изнашивания на 62–64 %. Стойкость нанонаполненных анаэробных составов к вибрационным нагрузкам до полутора раз, а к старению более, чем в два раза, больше исходных.

Результаты микроскопии поверхностей полимеров (Рисунок 7) показали, что смешивание анаэробных составов с наночастицами приводит к увеличению количества структурных элементов поверхности более, чем на 50%, что связано с ростом числа центров кристаллизации. Как следствие, увеличиваются скорость полимеризации и площадь поверхности нанокомпозиций. Количество структурных элементов поверхности нанонаполненного состава Унигерм-7 больше, чем у Loctite-601, что объясняет значительно большую прочность отечественного состава.

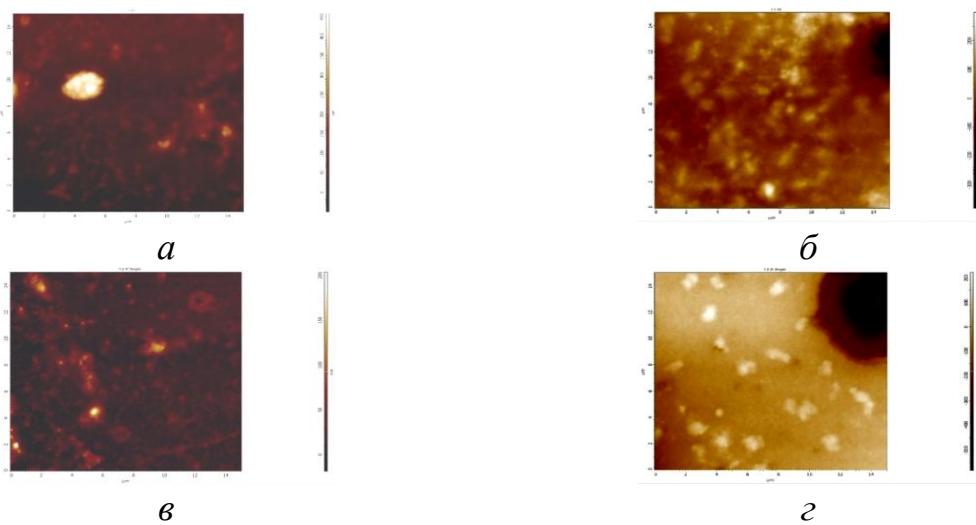


Рисунок 7.

Сканы поверхностей полимеров и нанокомпозитов:

- а* – Унигерм-7; *б* – Унигерм-7 + AEROSIL 380;
- в* – Loctite-601; *г* – Loctite-601 + AEROSIL 380

Стендовые испытания показали, что долговечность подшипникового узла, собранного с натягом 5 мкм, составила 36 ч ($6,50 \cdot 10^6$ циклов); долговечность

узлов со слоем нанокомпозиции в зазоре толщиной, равной 2 и 20 мкм, достигла соответственно 41,5 ч ($7,5 \cdot 10^6$ циклов) и 42,5 ч ($7,6 \cdot 10^6$ циклов).

Таким образом, использование в соединении «вал – подшипник» слоя полимерной нанокомпозиции Унигерм-7 + AEROSIL 380 (1,2 % по массе) толщиной 2 мкм способствует повышению долговечности подшипниковой опоры на 15,4 %.

В Главе 5 на основе теоретических изысканий и экспериментальных исследований описана разработанная технология сборки соединений «вал – подшипник» шпиндельных узлов металлорежущих станков с использованием полимерных нанокомпозиций. Показано, что ее можно применять на всех этапах жизненного цикла оборудования, включая сборку нового узла, его техническое обслуживание и ремонт. Предлагаемая технология может быть применена в том числе в комбинации с технологией использования дополнительной ремонтной детали (см. Таблицу).

Таблица.

Варианты применения технологии сборки соединения
«вал – подшипник» в шпиндельных узлах металлорежущих станков

Этап жизненного цикла ШУ*	Степень износа посадочной поверхности	Метод сборки	Цель	Используемые материалы
Сборка нового ШУ	Без износа			
Техническое обслуживание ШУ	Износ, при котором наличие полимерной прослойки не приведет к критическому снижению жесткости узла	С использованием полимерной нанокомпозиции	Предотвращение фреттинг-износа	Унигерм-7 + AEROSIL 380
Ремонт ШУ	Износ, при котором наличие полимерной прослойки приведет к критическому снижению жесткости узла	С использованием ДРД** и полимерной нанокомпозиции	Ремонт соединения; предотвращение фреттинг-износа	Унигерм-7 + AEROSIL 380 в комбинации с ДРД

* ШУ – шпиндельный узел.

** ДРД – дополнительная ремонтная деталь.

На основе разработанной и экспериментально подтвержденной математической модели (13) создана компьютерная программа, которая позволяет оценивать деформацию кольца подшипника в зависимости от характеристик прослойки и является инструментом принятия решения при выборе технологии сборки или ремонта шпиндельного узла.

Подготовка нанокомпозиции включает в себя введение 1,2 % по массе наночастиц AEROSIL 380 в состав Унигерм-7, последующее смешивание и ультразвуковую обработку компонентов в течение 60 с, которая производится непосредственно перед ее нанесением. При сборке соединения требуется нанести до 1–2 мл нанокомпозиции по окружности переднего края посадочной поверхности шпинделя, установить подшипник на шпиндель, удалить излишки состава и обеспечить его полимеризацию в течение 8–12 ч. Проверка точности и жесткости

станка после окончательной сборки выполняется в соответствии с рекомендациями, описанными в серии стандартов ИСО 230.

Разработанная технология апробирована на предприятиях АО «МПП имени В.В. Чернышева», АО «Российские космические системы» и АО «Протон-ПМ», а также рекомендована Бюро Центрального Совета ООО «СоюзМаш России» к внедрению на предприятии АО «Трансмашхолдинг». Ее применение позволяет на 25% снизить затраты на восстановление посадочных поверхностей в сравнении с методом плазменного напыления, а экономия средств от ее внедрения при сборке новых узлов составит порядка 100 % от затрат на замену подшипников за 20 лет эксплуатации станка за счет роста долговечности опор на 15%.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что одним из факторов, обуславливающих снижение долговечности шпиндельного узла, является фреттинг-износ посадочных поверхностей вала. Перспективным направлением решения этой проблемы является применение нанонаполненных анаэробных герметиков для сборки соединений «вал – подшипник» как при изготовлении новых узлов, так и в случае их технического обслуживания и ремонта.

2. Разработана математическая модель, определяющая жесткость подшипниковой опоры в зависимости от нагрузок, геометрических и физико-механических характеристик полимерной прослойки. Установлена степенная зависимость между модулем упругости полимерной прослойки и ее жесткостью.

3. Установлено, что внедрение нанонаполнителей в состав исходной полимерной матрицы позволяет добиться увеличения адгезионной прочности анаэробных герметиков до 63 % по нормальным и до 116 % по касательным разрушающим напряжениям, а также увеличения модуля упругости до 50 %. Наилучшие результаты показала нанокомпозиция на основе отечественного герметика Унигерм-7 с наполнителем AEROSIL 380, оптимальная массовая концентрация которого составила 1,2%.

4. Доказана адекватность предложенной математической модели, описывающей влияние толщины и модуля упругости полимерной основы, а также физико-механических свойств нанонаполнителя на жесткость подшипниковой опоры. Отклонения полученных значений жесткости от расчетных составили не более 2,5 %.

5. Экспериментально подтверждено, что нанонаполнение анаэробных герметиков способствует снижению интенсивности фреттинг-изнашивания контактирующих поверхностей до 64 %, повышению скорости полимеризации до 100 %, сопротивлению ползучести до 30 %, коэффициента теплопроводности до 82 %, стойкости к вибрационным нагрузкам и старению до 100 %.

6. Исследование структуры поверхностей образцов показало, что смешивание нанонаполнителей с исходной полимерной матрицей приводит к увеличению количества структурных элементов более, чем на 50 % по сравнению с ненаполненными составами, за счет чего увеличивается адгезионная прочность. У

нанокомпозиции на основе отечественного состава большее количество структурных элементов поверхности, чем у зарубежного аналога.

7. Стендовые испытания показали, что использование разработанной технологии сборки соединений «вал – подшипник» с использованием полимерной нанокомпозиции на основе анаэробного герметика Унигерм-7 и нанонаполнителя AEROSIL 380 в концентрации 1,2 % повышает долговечность подшипниковой опоры на 15,4 %.

8. Разработаны технология сборки соединения «вал – подшипник» в шпиндельных узлах металлообрабатывающих станков с использованием новой полимерной нанокомпозиции, методика расчета и компьютерная программа по оценке применимости технологии в зависимости от конструктивных особенностей узла.

9. Технология защищена патентом РФ на изобретение, аprobирована и внедрена на предприятиях АО «МПП имени В.В. Чернышева», АО «Российские космические системы» и АО «Протон-ПМ», а также рекомендована Бюро Центрального Совета ООО «СоюзМаш России» к внедрению на предприятии АО «Трансмашхолдинг». Применение разработанной технологии позволяет до 25 % снизить затраты на восстановление посадочных поверхностей, а экономия средств от ее внедрения при сборке новых узлов составит до 100 % от затрат на однократную замену подшипников.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Кононенко А.С., Кильдеев Т.А. Теоретическое и экспериментальное исследование жесткости шпиндельных узлов с промежуточным полимерным слоем в опорах металлообрабатывающих станков // Клеи. Герметики. Технологии. 2023. № 5. С. 39-47. (0,97 п.л. / 0,49 п.л.).

2. Кононенко А.С., Кильдеев Т.А., Михальченков А.М. Влияние тонкого промежуточного слоя из полимерной нанокомпозиции в соединении шпиндель-подшипник на жесткость и долговечность шпиндельных узлов металлорежущих станков // Клеи. Герметики. Технологии. 2021. № 4. С. 34-42. (1,19 п.л. / 0,6 п.л.).

3. Кононенко А.С., Игнаткин И.Ю., Кильдеев Т.А. Ремонт прецизионных подшипниковых соединений металлорежущих станков полимерными материалами // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 1(339). С. 43-47. (1,13 п.л. / 0,34 п.л.).

4. Кононенко А.С., Кильдеев Т.А., Соловьева А.А. Особенности восстановления шпиндельных валов металлорежущих станков полимерными материалами и нанокомпозициями на их основе // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 10. С. 3-8. (0,94 п.л. / 0,43 п.л.).

5. Кононенко А.С., Кильдеев Т.А., Сажаев А.А. Восстановление посадочных поверхностей шпинделя станка DMG MORI CTX 510 Ecoline полимерными нанокомпозициями // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. № 4-1(330). С. 140-146. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.).

6. Патент № 2812883, Российская Федерация, МПК B23P 6/00 (2006.01) F16B 11/00 (2006.01). Способ фиксации изношенных соединений «вал–подшипник» шпиндельных узлов металлообрабатывающего оборудования при помощи полимерной нанокомпозиции : № 2021103329 : заявл. 11.02.2021 : опубл. 05.02.2024 / Кононенко А.С., Кильдеев Т.А., Хаббатуллин Р.Р. – 3 с.

7. Effect of Thin Polymer Interlayers in the Spindle-Bearing Joint on the Stiffness and Durability of Spindle Bearing Assemblies of Mills. / Kildeev T.A. [et al.] // Intelligent Computing & Optimization. ICO 2023. Lecture Notes on Networks and Systems. Springer, Cham. 2023. Vol 855. P. 207–216. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50158-6_21. (0,94 п.л. / 0,43 п.л.).

8. Кононенко А.С., Кильдеев Т.А. Фиксация соединений «вал–подшипник» шпиндельных узлов металлообрабатывающего оборудования с применением полимерной анаэробной нанокомпозиции // Сборник трудов. Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции «Современные достижения в области kleев и герметиков: материалы, сырье, технологии». Н. Новгород, 2023. С. 92-97. (0,25 п.л. / 0,13 п.л.).

9. Кононенко А.С., Кильдеев Т.А. Исследование прочностных свойств и вибростойкости нанокомпозиций, применимых для ремонта соединений «вал–подшипник» транспортных средств // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте: Сборник статей международной научно-практической конференции. Липецк, 2022. С. 273-278. (0,22 п.л. / 0,11 п.л.).

10. Кильдеев Т.А. Кононенко А.С. Исследование радиальной жесткости соединения «вал–полимер–втулка» // МашТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении: Сборник трудов Международной научно-технической конференции. Москва, 2022. С. 314-317. (0,29 п.л. / 0,15 п.л.).

11. Кононенко А.С., Кильдеев Т.А. Реновация соединения «вал–подшипник» шпиндельных узлов металлорежущих станков с применением нанонаполненных ремонтных составов // Инновационные технологии реновации в машиностроении: Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана. Москва, 2019. С. 119-123. (0,25 п.л. / 0,13 п.л.).

Подписано в печать _____. Формат 60×84/16.
Печать трафаретная. Усл.-печ. л. _____. Тираж __ экз. Заказ № _____.
Отпечатано в издательском центре _____.
Адрес: _____.