

Министерство образования и науки РФ  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»

---

На правах рукописи



Кущенко Александра Владимировна

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ  
УЗЛОВ МАШИН С ПОМОЩЬЮ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность: 05.02.02 «Машиноведение, системы приводов  
и детали машин».

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук.

Санкт-Петербург – 2016.

Диссертация выполнена на кафедре «Транспортные и технологические системы», института «Металлургии, машиностроения и транспорта» Санкт-Петербургского автономного политехнического университета Петра Великого.

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Башкарев Альберт Яковлевич**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Васильков Дмитрий Витальевич**  
доктор технических наук  
**Анисимов Андрей Валентинович**

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «28» февраля 2017 года в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, ауд.118 г.у.ч.

Ученый секретарь

диссертационного совета

 Евграфов А.Н.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.**

**Актуальность работы** определяется разработкой новых, научно обоснованных методов защиты соединений с натягом от фреттинг-коррозии, и повышением на этой основе долговечности и надежности механизмов машин, снижением затрат на их восстановление.

**Научная новизна работы** состоит в:

1. разработке теоретических методов расчета на прочность и долговечность полимерных покрытий в прессовых посадках.
2. получении достоверных экспериментальных результатов исследования деформативных свойств и их характеристик для тонкослойных покрытий из полиамидов, работающих в условиях объемного сжатия.
3. результатах экспериментальных исследований фрикционных свойства и их характеристик для тонкослойных полиамидных покрытий и композитов на их основе.

**Практическая полезность работы** состоит в разработке рекомендаций по выбору для соединений с натягом в узлах машин толщины покрытия из полиамида и величины необходимого минимального натяга.

**Цель работы** – оценить возможность использования тонкослойных полиамидных покрытий и композитов на их основе в соединениях.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Изучить деформативные особенности тонкослойных полиамидных покрытий, работающих в условиях всестороннего сжатия в соединениях с натягом и определить их деформативные характеристики при действии постоянных и кратковременных нагрузок.
2. Исследовать адгезионные свойства некоторых композитов на основе полиамида наиболее перспективных для применения в виде тонко-

слойных покрытий в соединениях с натягом.

3. Исследовать влияние введения тонкослойных полиамидных покрытий на нагрузочные характеристики соединений с натягом и определить необходимые толщину покрытия и величину натяга.
4. Исследовать фрикционные свойства и их характеристики тонкослойных полиамидных покрытий и композитов на их основе.
5. Разработать методику расчета долговечности тонкослойных полиамидных покрытий при их работе в соединениях с учетом температуры эксплуатации и действующих нагрузок.

**Достоверность результатов** обеспечивается большим объемом экспериментов, выполненных с использованием современного оборудования и методов обработки полученных данных, сопоставлением установленных в работе закономерностей с результатами экспериментов и выводами других исследователей.

#### **Апробация работы.**

Основные положения диссертационной работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на 3 научно-технических конференциях и семинарах, в том числе: XLII неделе науки, СПбГПУ, 2013 г.; 4-й Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование», 2014 г.; 5-ой Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование», 2016 г.; межкафедральном научно-техническом семинаре кафедр «Машиноведение и основы конструирования» и «Транспортные и технологические системы», СПбПУ, прот.№03 от 14.11.2016.

#### **Публикации:**

Основные результаты работы изложены в 6 статьях, из которых 3 статьи опубликованы в изданиях, входящих в список ВАК РФ.

Библиографический список публикаций приведен в конце автореферата.

### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, библиографического списка из 110 наименований. Работа изложена на 107 страницах и включает 5 таблиц и 56 рисунков.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

**Во введении** обосновывается актуальность темы, излагается научная новизна работы и практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены особенности работы и ремонтов машин, работающих при различных условиях эксплуатации. Одним из перспективных направлений в работе по защите соединений с натягом в узлах и передаточных механизмах от фреттинг-коррозии может быть использование полимерных материалов.

Полимеры уже давно и широко применяются в конструкциях машин. Исследования по применению полимеров в узлах трения были выполнены В.Ф. Платоновым, А.Н. Раевским, А.Я. Башкаревым, В.В. Букреевым, С.И. Виноградовым, С.А. Иваньковым, Н.И. Мироновым, А.В. Стукачом, и многими другими авторами. В их работах создана необходимая теоретическая, методологическая и технологическая основа для проектирования соединений с тонкослойными полиамидными покрытиями на стальной подложке, работающих в условиях трения скольжения, например, в подшипниках, плунжерных парах, силовом гидроприводе и т.п. Подробные исследования по применению полимерных материалов в неподвижных соединениях с натягом пока не проводились.

Общей целью данной работы является рассмотрение возможности использования тонкослойных покрытий из полиамида или композитов на его основе

в соединениях с натягом для повышения долговечности и ремонтпригодности узлов машин.

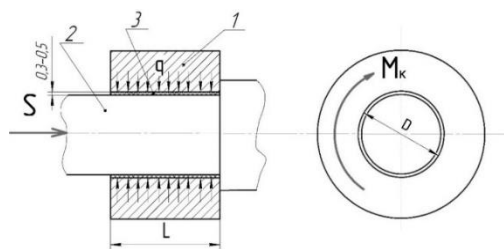


Рис. 1 Схема применения полимерного покрытия при создании соединения с натягом.

1 – втулка, 2 – вал, 3 – полимерное покрытие,  $S$  – осевая нагрузка,  $M_k$  – внешний крутящий момент,  $q$  – радиальное давление в зоне сопряжения,  $D$  – диаметр сопряжения по наружному диаметру полимерного слоя.

В такой конструкции соединения полимерный слой наносится с использованием технологии псевдооживленного слоя на поверхность стального вала и соединяется с ним силами адгезии. Наружная поверхность полимерного слоя протачивается до диаметра, образующего необходимый натяг с отверстием втулки.

В процессе работы на полимерное покрытие передается давление со стороны металлических деталей, сдвигающая осевая нагрузка и касательные напряжения от приложенного внешнего момента. То есть, полное напряженное состояние полимерного слоя включает как нормальные (радиальные и окружные), так и касательные напряжения. Возможность применения полимерного покрытия в соединении с натягом должна определяться, прежде всего, по оценке прочности соединения на сдвиг, которая зависит от величины радиальных напряжений в зоне контакта сопрягаемых поверхностей и коэффициента трения покоя между ними. Исследований, направленных на изучение коэффициента трения покоя полиамидных материалов, нанесенных в виде тонкослойных покрытий по стали, пока не проводилось.

Нарушение соединения под действием нагрузок может произойти по двум причинам. Первая – сила трения по наружной поверхности полимерного слоя окажется меньше усилий необходимых для преодоления внешних сил. Вторая – эти же усилия станут выше прочности адгезионного соединения поли-

мера с поверхностью вала. Под воздействием нагрева и передаваемых нагрузок происходит деструкция полимерных молекул, в результате чего на границе контакта стальной и полимерных поверхностей появляются активные радикалы, создающие новые адгезионные связи. Процесс возникновения и разрушения адгезионных связей между полимером и подложкой может быть описан с помощью термофлуктуационной теории прочности. Значительный вклад в использование термофлуктуационной теории прочности применительно к адгезии полимерных материалов к стальной подложке внесли труды А.Я Башкарева, В.А. Петрова, В.И. Веттегрена. Ими установлены основные закономерности развития адгезионных процессов во времени при воздействии температуры и нагрузок применительно к полиамидным подшипникам скольжения. Однако для полиамидных покрытий, работающих в соединениях с натягом необходимо продолжить эти исследования.

На основании проведенного обзора и анализа результатов ранее выполненных работ были сформулированы цели и задачи исследования.

**Во второй главе** изложены теоретические подходы и результаты экспериментальных исследований деформативных характеристик тонкослойных полиамидных покрытий, нанесенных на стальную подложку.

Деформативные свойства полиамидов существенно зависят не только от времени действия нагрузки и температуры, но и от технологии их переработки, поскольку ее режимы определяют строение их надмолекулярных структур, степень термодеструкции и т.д. Методика экспериментальных исследований базировалась на теоретических обоснованиях теории упругости.

На основании проведенных экспериментов было установлено, что статический модуль упругости тонкослойного покрытия из полиамида ПА-6 составляет  $E_n = 530$  МПа, для полиамида ПА-68 – 1250 МПа, а для поликапроамида -1425 МПа. Было также подтверждено, что значение коэффициента Пуассона для таких покрытий составляет 0,49.

Под действием кратковременных нагрузок модуль упругости тонкослойных полиамидных покрытий существенно возрастает. Так, например, для полиамида ПА-6 он становится больше в 350 раз.

В третьей главе рассмотрены адгезионные особенности и свойства полиамидных покрытий и композитов на их основе.

Были исследованы адгезионные свойства к стали чистого полиамида и его композиций со свинцовым и железным суриком и стеклянным порошком.

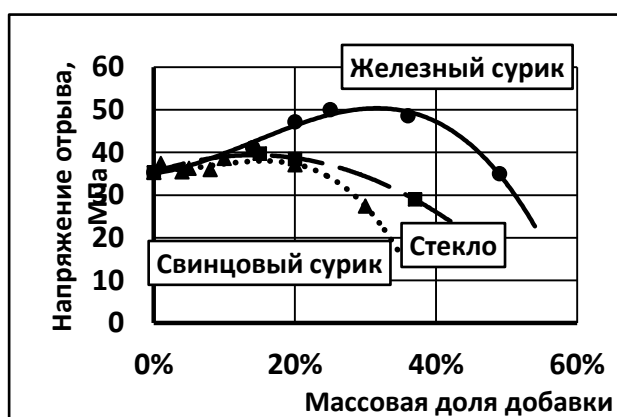


Рис. 2 Изменение адгезионных характеристик композитов на основе полиамида в зависимости от вида и массовой доли добавок.

До массового содержания железного сурика в 30% величина адгезии этого композита к стали увеличивается примерно на 60%, а при большем содержании начинает снижаться. Поэтому в соединениях с натягом рационально использовать тонкослойные покрытия, состоящие не из чистого полиамида, а композиты на его основе, которые могут содержать до 40% железного сурика.

Существенное отличие величины адгезионных характеристик композита с использованием железного сурика по сравнению с другими добавками может быть предварительно объяснено эффектом сжатия молекул полиамида за счет образования координационных связей между ионами железа, входящих в состав сурика и атомов азота, существующих в расплаве полиамида. Этот эффект был обнаружен при исследовании адгезии тонких слоев полиамида к стальной подложке. В свинцовом сурике и в стеклянном порошке ионы железа отсутствуют.



В четвертой главе выполнен анализ напряжений, действующих в соединениях с натягом при наличии полиамидного покрытия.

Особенностью сопряжения с натягом при использовании полимерных покрытий является то, что у материалов, входящих в него существенно различаются деформативные характеристики.

В качестве примера была рассчитана величина давления на поверхности раздела при наличии полиамидного слоя ПА-6 толщиной 0,5 мм и при его отсутствии для стандартного соединения с натягом Н7/s7 при различных диаметрах сопряжения от 18 до 200 мм.

Из расчетов следует, что для стальных деталей радиальное давление на поверхности вала меняется в диапазоне от 200 до 30 МПа. Наличие слоя полиамида толщиной 0,5 мм существенно снижает давление на поверхности сопряжения по сравнению со стальными деталями (от 40 до 6 МПа). Значительное влияние на величину давления на поверхности сопряжения оказывает толщина слоя полиамида при сохранении одного и того же посадочного диаметра. При уменьшении толщины слоя полиамида до 0 давление на поверхности стремится к величине давления у стальных деталей.

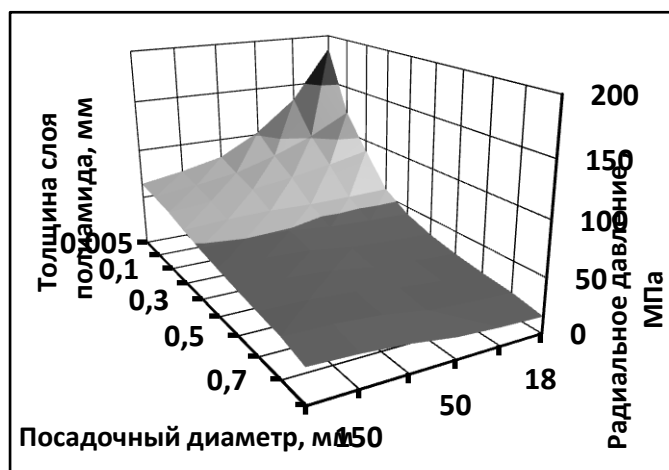


Рис.3 Изменение радиального давления на поверхности полиамидного слоя от толщины слоя полиамида и посадочного диаметра для стандартной посадки Н7/s7.

Существенное падение радиального давления на поверхности сопряжения при наличии тонкослойного полиамидного покрытия вала и зависимость давления от толщины слоя полимера приводит к необходимости пропорцио-

нального увеличения натяга для создания давления совпадающего с давлением у стальных деталей. Вместе с тем, при увеличении максимального натяга радиальные и окружные напряжения в слое полиамида могут превысить предел его прочности на одноосное сжатие, который по справочным данным составляет 80-100 МПа. Поэтому и максимальный натяг должен быть соответственно ограничен. Ограничение величины максимального натяга не сказывается на работоспособности соединения, так как необходимые нагрузочные характеристики должны быть выдержаны не при максимальном, а при минимальном натяге.

Из проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Наличие тонкослойного полиамидного покрытия на поверхности вала в сопряжении с натягом приводит к снижению радиального давления на поверхности раздела. Причем это снижение тем меньше, чем меньше толщина слоя полимера.
2. Для компенсации снижения давления необходимо пропорционально увеличивать натяг и максимально уменьшать толщину слоя полимера.

**В пятой главе** рассматриваются результаты экспериментальных исследований величины коэффициента трения покоя тонкослойных полиамидных и композитных покрытий на их основе по стали.

Испытания проводились на образцах, имеющих тонкослойное полиамидное покрытие.

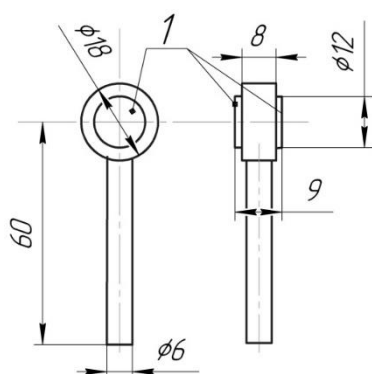


Рис. 4 Образцы для испытаний. 1 - полиамидное покрытие.

Толщина слоя полиамида составляла от 0,065 до 0,5 мм. Для нанесения полиамида образцы нагревались до температуры 270 - 300<sup>0</sup> С, после чего неоднократно погружались в псевдооживленный слой полиамидного порошка, который оплавлялся на поверхности за счет аккумулированного в них тепла. После охлаждения образцы подвергались механической обработке. Шероховатость поверхности полиамидного слоя составляла  $R_a=2,5$  мкм.

Для оценки фрикционных свойств тонкослойных полиамидных покрытий были проведены измерения на испытательной машине ИР 5047-50-11 их коэффициента трения покоя по стали в зависимости от давления в зоне трения. Из результатов экспериментов следует, что коэффициент трения покоя полиамидного покрытия по стали не является постоянной величиной, а уменьшается с ростом давления и при этом он ниже на 30-40 % чем для пары сталь-сталь (рис.5).

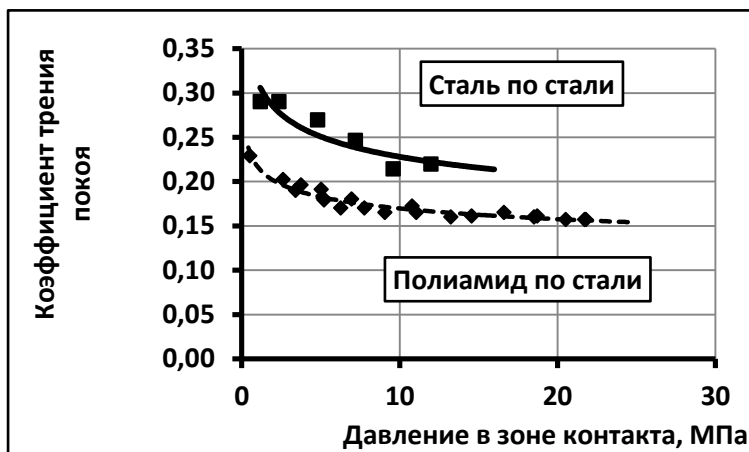


Рис. 5 Коэффициенты трения покоя полиамида по стали и стали по стали.

Установлено также, что коэффициент трения покоя полиамида по стали зависит не только от давления в зоне трения, но также и от толщины слоя полиамида. При уменьшении толщины покрытия от 0,12 до 0,065 мм во всем диапазоне давлений от 1 до 30 МПа наблюдается рост коэффициента трения покоя (например, от 0,17 до 0,25 при давлении в зоне трения 1 МПа и от 0,08 до 0,14 при 30 МПа). При толщинах покрытия более 0,12 мм коэффициент трения покоя полиамида по стали постоянен (рис.6).

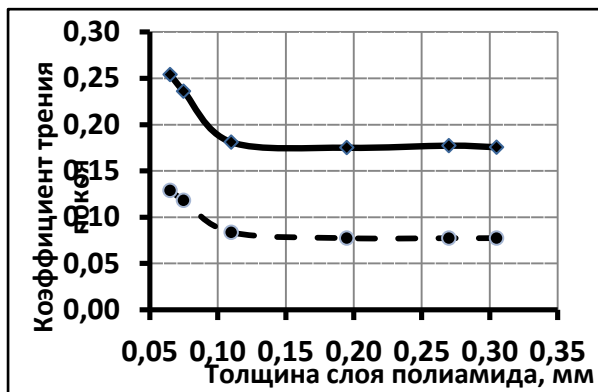


Рис. 6 Изменение величины коэффициента трения покоя полиамида по стали в зависимости от толщины слоя. (Сплошная линия при давлении в зоне трения в 1 МПа, пунктирная при 30 МПа).

Результаты экспериментов подтверждают предположение о том, что при нанесении тонкослойных полиамидных покрытий на стальную подложку, в слое полиамида толщиной до 0,1 мм непосредственно примыкающему к стальной поверхности развиваются сильные напряжения сжатия (до 400 МПа) за счет диффузии атомов железа в расплавленный полимер, что приводит к существенному росту твердости поверхности, а значит, и к увеличению механической составляющей в силах трения.

Более низкий коэффициент трения покоя полиамида по стали, чем у пары «сталь-сталь» свидетельствует о том, что при использовании тонкослойных полимерных покрытий в соединениях с натягом необходимо найти способ повышения коэффициента трения покоя полимера по стали за счет применения различных присадок, т.е. созданием композитных смесей.

Для оценки возможности повышения величины коэффициента трения покоя полиамида по стали были использованы пять видов присадок: свинцовый сурик, стеклянный порошок, асбест, цемент и железный сурик.

Величины коэффициентов трения покоя по стали композитов на основе полиамида, содержащих свинцовый сурик, стеклянный порошок и цемент не существенно отличаются от соответствующих величин для покрытия из чистого полиамида и поэтому не могут быть рекомендованы к использованию в соединениях с натягом. Добавка асбеста в количестве до 10% массовой доли приводит к росту коэффициента трения покоя, однако, из-за значительной разницы в плотности распушенного асбеста и порошка полиамида использо-

вание асбеста весьма затруднено при технологии вибровихревого нанесения тонкослойных покрытий.

Измерение величины коэффициента трения покоя композита на основе полиамида, содержащего 20% железного сурика, показало, что его значения совпадают с аналогичными значениями для пары «сталь-сталь» (рис.8).

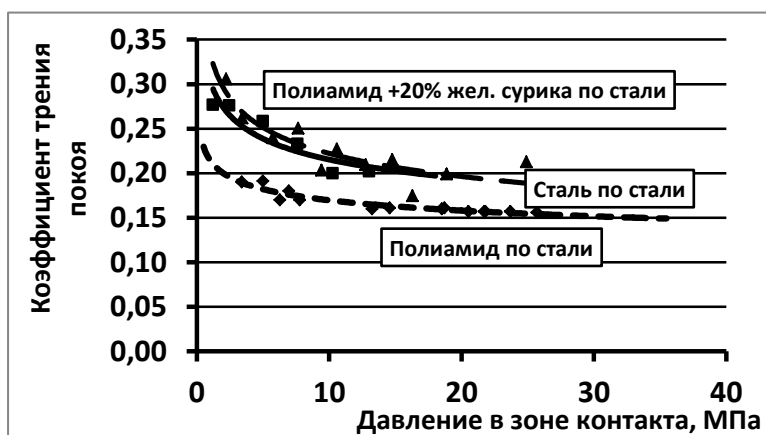


Рис. 8 Изменение коэффициента трения покоя композита из полиамида и 20% железного сурика по стали от давления в зоне контакта.

В шестой главе сформулированы рекомендации по выбору характеристик полиамидных покрытий для соединений с натягом и рассматриваются результаты экспериментального определения их нагрузочных возможностей, а также теоретические подходы к определению долговечности. Выполнены практические расчеты применительно к условиям работы строительных машин.

Рекомендации по выбору характеристик соединений с натягом, в которых используется покрытие вала на основе полиамида, сформулированы на основе теоретических исследований и экспериментальных работ.

1. Для обеспечения необходимого радиального давления на поверхности полиамидного покрытия вала следует использовать увеличенные натяги по сравнению с натягами, предусмотренными ГОСТ 25347-82 «Поля допусков и рекомендуемые посадки» для стальных деталей. Конкретная величина необходимого минимального натяга зависит от посадочного диаметра вала и толщины слоя полиамидного покрытия и может быть рассчитана по формуле:

$$N_{\min} = q_{\min} \cdot D_n \cdot \left[ \frac{(1 - \mu_e) \cdot D_2^2 + (1 + \mu_e) \cdot D_1^2}{E_e \cdot (D_2^2 - D_1^2)} + \frac{(1 - \mu_n^2)}{E_n \cdot \left[ \frac{D_n}{2 \cdot (D_n - D_2)} + \mu_n \right]} + \frac{(1 - \mu_{em}) \cdot D_n^2 + (1 + \mu_{em}) \cdot D_4^2}{E_{em} \cdot (D_4^2 - D_n^2)} \right], \quad (1)$$

где  $N_{\min}$  – минимально необходимый натяг, м;  $q_{\min}$  - радиальное давление минимально необходимое для обеспечения заданных нагрузочных характеристик осевой силы и крутящего момента, Па;  $D_n$  - посадочный диаметр, м;  $D_1$  - диаметр внутреннего отверстия вала, м;  $D_2$  - наружный диаметр вала, м;  $D_4$  - наружный диаметр втулки, м;  $E_e$  - модуль упругости материала вала, Па;  $\mu_e$  - коэффициент Пуассона материала вала;  $E_{em}$  - модуль упругости материала втулки, Па;  $\mu_{em}$  - коэффициент Пуассона материала втулки;  $E_n$  - статический модуль упругости полимера, Па;  $\mu_n = 0,49$  - коэффициент Пуассона полиамидного покрытия вала.

Уровень минимального радиального давления на поверхности полимерного слоя  $q_{\min}$  должен совпадать с соответствующим давлением в соединении с натягом деталей без полиамидного слоя:

$$q_{\min} = \frac{E_{cm} \cdot N_{\min \text{ ГОСТ}}}{D_n \cdot \left[ \frac{D_n^2 + D_1^2}{D_n^2 - D_1^2} + \frac{D_4^2 + D_n^2}{D_4^2 - D_n^2} \right]}, \quad (2)$$

где  $N_{\min \text{ ГОСТ}}$  - минимальный натяг, предусмотренный ГОСТ 25347-82 «Поля допусков и рекомендуемые посадки», для соединения с натягом деталей из стали соответствующего посадочного диаметра  $D_n$ .

Минимальный расчетный натяг при использовании полиамидного покрытия должен быть увеличен на удвоенную величину средне арифметической высоты микронеровностей поверхности  $\Delta N_{\min} = 2R_a$ .

2. В качестве покрытия вала следует использовать композит на основе

полиамида содержащий от 20 до 40% массовой доли железного сурика. Коэффициент трения покоя такого композита в зоне радиальных давлений, действующих в соединении, может быть принят равным  $f_n = 0,25$ ,

3. Толщина слоя полиамидного композита, нанесенного на вал должна быть минимально возможной.

Для экспериментальной проверки нагрузочных характеристик соединений с натягом при наличии полиамидного слоя были изготовлены стальные образцы с посадочным диаметром 30 мм.

Запрессовка вала во втулку и их последующая распрессовка выполнялась с помощью гидравлического пресса. Усилие запрессовки и распрессовки измерялось механическим динамометром.



Рис. 9 Втулки с запрессованными валами с полиамидным покрытием.

Всего было проведено 57 опытов с натягами различной величины от 0,02 до 0,33 мм. Каждый опыт повторялся не менее 5 раз.

Сравнение расчетных величин усилий запрессовки и распрессовки с результатами экспериментов показывает, что расхождение между результатами находится в пределах от 4 до 17%, что может быть объяснено нестабильностью величин коэффициентов трения скольжения и покоя полиамидного покрытия по стальной поверхности втулки, а также наличием дополнительных дефектов формы образцов, таких как овальность и конусность. С учетом вышесказанного, данные результаты можно признать приемлемыми и подтверждающими справедливость определения деформативных и фрикционных характеристик тонкослойных полиамидных покрытий вала для работы в соединениях с натягом, а также справедливость методов расчета радиальных давлений на поверхности таких покрытий.

Известно, что с повышением температуры прочность адгезионного соединения снижается, а с повышением давления наоборот увеличивается. Повышение температуры сопровождается необратимой термодеструкцией адгезионных связей. Процессы изменения адгезионной прочности могут быть описаны в рамках термофлуктуационной теории прочности, разработанной акад. С.Н. Журковым и его школой.

Значение начальной адгезионной прочности  $[\tau]_0^T$  при температуре  $T$  эксплуатации можно рассчитать по формуле:

$$[\tau]_0^T = [\tau]_0 - h \cdot (T - T_0), \quad (3)$$

где  $T_0$  - нормальная температура;  $[\tau]_0$  - адгезионная прочность при нормальной температуре. Величина коэффициента  $h$  зависит от состава полимерной композиции. Используя выражение (3), экспериментально было определено ее значение для полиамида ПА-6 (таблица 1). Для этого при различной температуре от плюс 20<sup>0</sup>С до плюс 80<sup>0</sup>С измерялась величина адгезии полиамида к стальной подложке  $[\tau]_0^T$ .

Таблица 1.

Коэффициенты для расчета прочности адгезии

покрытия из полиамида ПА-6 к стальной поверхности.

Материал	h, МПа*град К	U <sub>a</sub> , Дж/моль*10 <sup>3</sup>	γ, Дж/моль*МПа
Полиамид ПА-6	0,14	131,57	12,28

За счет действующих контактных давлений  $q$  прочность адгезии увеличивается. По результатам экспериментов для полиамидов зависимость адгезионной прочности от давления можно рассчитывать по формуле:

$$[\tau]_q = [\tau]_0 + 4q^{0.5} \quad (4)$$



Таким образом, прочность адгезионного соединения полимерного покрытия с валом  $[\tau]_t^{T,q}$  при нагреве и действующем давлении  $q$  к моменту  $t$  будет равна:

$$[\tau_a]_t^{T,q} = [\tau]_0^T \left( 1 - \frac{t}{\tau_0 \exp \frac{u_a - \gamma\tau}{RT}} \right) + 4q^{0.5} \quad (5)$$

Момент разрушения адгезионного соединения  $t_3$  наступит, когда его прочность уменьшится до уровня напряжений, возникающих от действия сдвигающей нагрузки под действием осевой силы и крутящего момента, т.е.

$$[\tau]_t^{T,q} = \tau.$$

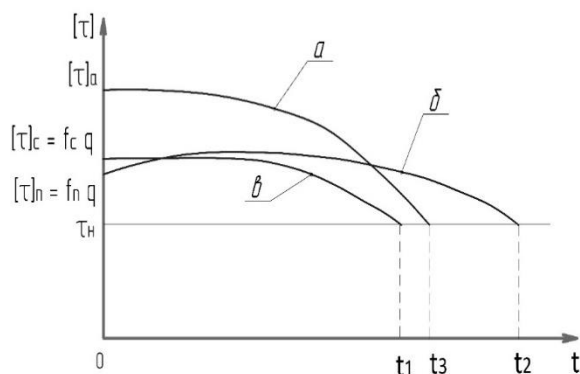


Рис. 10. Изменение характеристик прочности во времени.

На рис. 10 обозначено:  $\tau_n$  – средняя величина касательных напряжений от рабочих нагрузок;  $[\tau]_c$  (кривая в) – прочность посадки деталей из стали;  $[\tau]_n$  (кривая б) – прочность соединения поверхностей стального отверстия втулки и полимерного слоя, нанесенного на вал;  $[\tau]_a$  (кривая а) – прочность адгезионного соединения полимерного слоя со стальным валом.

С учетом этого, с помощью выражения (3) можно определить долговечность адгезионного соединения  $t_3$ .

$$t_3 = \left( 1 - \frac{\tau}{[\tau]_0^{T,q}} \right) \cdot t_0 \cdot \exp \frac{u_a - \gamma\tau}{RT} \quad (6)$$

Полиамидные покрытия на стальную подложку наносятся с помощью мелкодисперсных порошков, напыляемых на предварительно нагретые детали, на которых они расплавляются за счет аккумулированного в стали тепла. В

процессе термодеструкции молекул полимера появляются активные радикалы, которые обеспечивают возникновение адгезионных связей. Их количество за элементарный отрезок времени при постоянной температуре и нагрузке равно:

$$dN_1 = z \cdot \frac{dt}{t_0 \cdot \exp \frac{u_n - \gamma\tau}{RT}} \quad (7)$$

где  $u_n$  – энергия активации процесса разрушения полимера,  $R$  – газовая постоянная ( $R = 8,314$  кДж/кмоль·К),  $\gamma$  – коэффициент, отражающий чувствительность материала к механическим напряжениям  $\tau$ ,  $T$  – температура по Кельвину,  $t_0$  – коэффициент равный  $10^{-11} - 10^{-13}$  с, постоянный для всех материалов предэкспоненциальный коэффициент (по мнению авторов термофлуктуационной теории прочности он равен периоду вращения электрона вокруг ядра атома);  $z$  – коэффициент меньше единицы, отражающий долю активных радикалов, которые создают адгезионные связи.

Из числа образовавшихся к моменту  $\varphi$  адгезионных связей к следующему моменту  $t_*$  произойдет их деструкция в количестве:

$$dN_2 = dN_1 \int_{\varphi}^{t_*} \frac{dt}{t_0 \exp \frac{u_a - \gamma\tau}{RT}} \quad (8)$$

Здесь  $u_a$  – энергия активации процесса разрушения адгезионных связей в соединении «полимер – сталь».

Число остающихся адгезионных связей есть разница:

$$dN_3 = dN_1 - dN_2 = \left( 1 - \int_{\varphi}^{t_*} \frac{dt}{t_0 \exp \frac{u_a - \gamma\tau}{RT}} \right) dN_1 \quad (9)$$

Общее число сохранившихся связей с начала работы соединения при постоянной температуре и нагрузках на сдвиг определяется выражением:

$$N_3 = z \cdot \frac{t_*}{t_0 \exp \frac{u_a - \gamma \tau}{RT}} \left( 1 - \frac{t_*}{2t_0 \exp \frac{u_a - \gamma \tau}{RT}} \right) \quad (10)$$

Очевидно, что представленная функция имеет экстремум, т.е. в определенный момент  $t_*^{on}$  количество адгезионных связей, сначала увеличиваясь, затем начнет уменьшаться. Это значит, что со временем прочность соединения с натягом будет определяться только силой трения между сталью и полимерным слоем. Приравняв к нулю первую производную по  $t_*$ , получаем выражение для определения оптимального времени  $t_*^{on}$ , при котором  $N_3$ , а следовательно, и адгезионная прочность имеют максимальное значение:

$$\frac{1}{t_0 \exp \frac{u_a}{RT}} \cdot \left( 1 - \frac{t_*}{2t_0 \exp \frac{u_a}{RT}} \right) = 0 \quad (11)$$

Отсюда: 
$$t_*^{on} = t_0 \exp \frac{u_a}{RT},$$

По разработанной методике был выполнен расчет долговечности соединения с натягом, в котором на вал нанесено покрытие толщиной 0,5 мм из полиамида П 66/6. Работа соединения проходит при температуре плюс 60° С (333° К).

В данных условиях работы долговечность соединения оказывается не менее 15500 ч. Для большинства строительных машин, эта долговечность обеспечивает срок службы узла в 8 лет, что превышает срок службы всей машины.

**В седьмой главе** излагаются основные выводы, научные и практические результаты работы.

## **Основные выводы.**

1. Проведенные исследования и натурные эксперименты позволяют утверждать, что применение тонкослойных полиамидных покрытий на поверхности вала в соединениях с натягом в узлах машин в температурном диапазоне от минус 40<sup>0</sup> С до плюс 80<sup>0</sup> С как средство защиты соединения от фреттинг-коррозии обосновано, так как повышает их износостойкость и долговечность. При этом повышается ремонтпригодность узлов, уменьшаются затраты на их восстановление.
2. Долговечность соединений с натягом с полиамидными покрытиями в узлах машин ограничивается процессами разрушения адгезионных связей между слоем полиамида и поверхностью стального вала. Однако, как правило, расчетная долговечность такого соединения превышает ресурс до капитального ремонта многих машин, например, строительной техники.

## **Научные результаты.**

1. Разработана методика расчета на прочность и долговечность соединений с натягом при наличии полиамидных тонкослойных покрытий.
2. Разработана методика расчета необходимых натягов для соединений с использованием тонкослойных полиамидных покрытий.
3. Исследованы адгезионные свойства к стали композитных материалов на основе полиамида с добавлением в него разнообразных наполнителей.
4. Экспериментально определены деформативные характеристики тонкослойных полиамидных покрытий, нанесенных по технологии псевдоожигенного слоя для соединений с натягом. Подтверждено, что при работе тонкослойных полиамидных покрытий в соединениях с натягом коэффициент Пуассона материала равен 0,49.
5. Выполнены экспериментальные исследования величины коэффициента трения покоя тонкослойного покрытия из полиамида и композитов на

его основе по стали. Установлено, что коэффициент трения покоя для исследованных материалов уменьшается с ростом давления до 25-30 МПа, а при дальнейшем росте давления стабилизируется. Для давлений, типичных для соединений с натягом его величина может быть принята постоянной.

6. Экспериментально установлено, что величина коэффициента трения покоя полиамидного покрытия по стали зависит не только от давления в зоне трения, температуры и состава композита на основе полиамида, но также и от толщины слоя покрытия. Наибольшее его значение наблюдается при толщине покрытия менее 0,1 – 0,12 мм. При толщине слоя более 0,12 мм коэффициент трения покоя не изменяется.

### **Практические результаты.**

1. Установлено, что наличие покрытия, упругие характеристики которого существенно ниже, чем у стали, требует для сохранения нагрузочных характеристик соединения, увеличенных натягов по сравнению с натягами по ГОСТ 25347-82 «Поля допусков и рекомендуемые посадки». Увеличение натягов зависит не только от величины посадочного диаметра соединения, но и от толщины слоя покрытия. Рекомендуется использовать возможно более тонкие покрытия.
2. Разработаны рекомендации по выбору состава смеси на основе полиамида для тонкослойных покрытий стального вала, содержащую от 20 до 40% массовой доли железного сурика, у которой коэффициент трения покоя по стали совпадает с коэффициентом трения покоя стали по стали. Его значение для расчетов нагрузочных характеристик соединения может быть принято равным 0,25.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

**В изданиях входящих в перечень ВАК РФ:**

1. Башкарев А.Я., Кущенко А.В. Деформационные особенности и свойства тонкослойных полиамидных покрытий при создании соединений с натягом // Научно-технические ведомости СПбГПУ, №2 (219), СПб, изд. СПбГПУ, 2015, с. 151-158.
2. Башкарев А.Я., Кущенко А.В. Повышение долговечности соединений с натягом нанесением полимерного покрытия на поверхность вала // Вестник машиностроения №10, М. изд. «Инновационное машиностроение», 2015, с. 60-64.
3. Кущенко А.В. Управление фрикционными свойствами полиамидных покрытий в соединениях с натягом // Научно-технические ведомости СПбГПУ, №1 (238), СПб, изд. СПбГПУ, 2016, с. 155-162.

**В других изданиях:**

1. Башкарев А.Я., Кущенко А.В., Корелин В.Ф. Возможность применения полиамидных покрытий при восстановлении прессовых посадок // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение: наука и образование» СПб, изд. СПбГПУ, 2014, с. 689-699.
2. Башкарев А.Я., Кущенко А.В., Корелин В.Ф. Исследование коэффициента трения покоя полиамидного покрытия по стали // Современные наукоемкие технологии, № 1, г. Пенза, изд. дом «Академия естествознания», 2015, с. 42-47.
3. Башкарев А.Я., Букреев В.В., Кущенко А.В., Стукач А.В. Долговечность соединений деталей машин с полиамидными покрытиями в узлах трения строительной техники. // Материалы 5-й Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение: наука и образование» СПб, изд. СПбГПУ, 2016, с. 340-349.