

На правах рукописи



ИВАНЬКОВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
УЗЛОВ ТРЕНИЯ С ПОЛИАМИДНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
лауреат государственной премии
Башкарев Альберт Яковлевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Потапов Анатолий Иванович;
кандидат технических наук, доцент
Заборский Евгений Васильевич

Ведущая организация: Институт проблем машиноведения РАН
(ИПМаш РАН) Санкт-Петербург

Защита состоится «27» декабря 2011 г. в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 в ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу: **195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, уад. 41, 1 учебный корпус.**

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан « » ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,



Евграфов А.Н.

Актуальность работы.

Актуальным вопросом машиностроения всегда остается проблема повышения долговечности тяжело нагруженных узлов трения, работающих в сложных условиях эксплуатации.

Одним из путей увеличения их срока службы стало применение антифрикционных пластмасс. В настоящее время накоплен достаточно большой опыт использования полимерных материалов в различных отраслях машиностроения, что связано с рядом их достоинств: высокой износостойкостью, низким коэффициентом трения, сокращением расходов на эксплуатацию и ремонт механизмов и т. п.

Из многообразия полимерных материалов, по наиболее удачному сочетанию свойств для узлов трения, можно выделить полиамиды. Они применяются, как при создании монолитных деталей, так и в качестве тонкослойных антифрикционных покрытий, прочно соединенных с металлической подложкой. По износостойкости, при корректном использовании, полиамиды превосходят не только другие полимеры, но и многие антифрикционные металлы и сплавы. Другим их достоинством является высокая технологичность, обусловленная сравнительно низкой температурой плавления и хорошей текучестью расплавов.

Тонкое полиамидное покрытие может воспринимать нагрузки, создающие напряжения, которые значительно превышают предел прочности полиамида в монолите. Это объясняется тем, что покрытие, прочно удерживаемое на металлической поверхности силами адгезии, имеет ограниченную возможность к деформированию. Благодаря малой толщине полимерного слоя (менее 0.35 мм) увеличивается его теплопроводность, что существенно уменьшает тепловую напряженность узла трения.

Использование полимеров в узлах трения в виде тонкослойных покрытий, позволяет без больших экономических затрат применять особо высококачественные композиты, в том числе включающие наноструктурные материалы, такие как фуллерены.

Но все это становится возможным только при обеспечении надежного соединения покрытия с металлической подложкой. Практический опыт показывает, что именно нестабильность адгезии антифрикционного слоя к подложке ограничивает их широкое применение, так как в результате воздействия неблагоприятных факторов в процессе эксплуатации происходит постепенное снижение прочности адгезии. Следовательно, первоочередной задачей является повышение стабильности адгезии полимерных покрытий.

В предыдущих работах в основу расчетов на прочность адгезии полимерного покрытия закладывались феноменологические теории прочности, то есть сравнение прочности адгезии нанесенного покрытия и возникающих под действием нагрузки напряжений. Поэтому все исследования были направлены на определение технологических режимов, при которых достигалась максимальная адгезионная прочность. Были созданы теории расчета оптимальных температурно-временных технологических режимов и выведены аналитические зависимости для их расчета с учетом металлоемкости покрываемой полимером детали.

Однако уже эти зависимости позволяли предположить, что от этих параметров зависит не только начальная адгезионная прочность, но и динамика ее последующего изменения. Причем, режимы, обеспечивающие высокую адгезионную прочность, не всегда удовлетворяют условию долговечности для конкретных рабочих нагрузок и температур.

Таким образом, дальнейшее продвижение в узлы трения новых перспективных полимерных композитов требует создания методов расчета их адгезии на прочность с учетом не только значения действующих нагрузок, но и планируемого времени эксплуатации подшипника скольжения. Благодаря этому станет возможным определение диапазона надежного применения полимерных антифрикционных покрытий.

Поэтому выполненное исследование, можно считать **актуальным** направлением по продвижению в конструкции машин новых перспективных материалов.

Цель работы и задачи исследования.

Целью настоящей работы является совершенствование методов расчета тяжело нагруженных металлополимерных узлов трения. Для ее достижения необходимо было решить следующие задачи.

- Провести анализ работ, посвященных изучению полимеров, применяемых в узлах трения машин, и обосновать выбор материалов наиболее отвечающих требованиям эксплуатации тяжело нагруженных механизмов.
- Определить оптимальную для решения поставленных задач методику испытаний, которая позволит получить достаточное количество достоверных экспериментальных данных.
- Провести экспериментальное исследование влияния технологических и эксплуатационных температурных режимов на долговечность полимерных покрытий в том числе модифицированных наноматериалами.
- Создать научно-обоснованную физико-математическую модель для расчета долговечности адгезии антифрикционных полимерных покрытий.
- Ввести в методики расчетов на прочность антифрикционного полимерного покрытия фактор времени.

Научная новизна.

- Предложена физико-математическая модель для прогнозирования работоспособности металлополимерных композиций, основанная на кинетическом представлении о природе прочности твердых тел.

- В разработанной методике впервые долговечность адгезии антифрикционного полимерного покрытия рассматривается в виде двух временных этапов: технологическом и эксплуатационном.

- Исследовано влияние на адгезию полиамидов фуллерена, который в настоящее время стал рекомендоваться для улучшения антифрикционных свойств полимеров.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученный комплекс результатов исследования позволяет давать рекомендации по применению антифрикционных полимерных покрытий в тяжело нагруженных узлах трения с учетом планируемого срока их эксплуатации и режимов нагружения.

Достоверность результатов обеспечивается использованием фундаментальных положений физики разрушения материалов, большим объемом экспериментов, выполненных с привлечением современных методов исследования, 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 5 научно-технических конференциях и семинарах, в том числе на: XXXVII Неделе наук, СПб, СПбГПУ, 2008; XXXVIII Неделе наук, СПб, СПбГПУ, 2009; 11-й международной научно-практической конференции «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня», СПб, 2009; Научно-техническом семинаре кафедры «Транспортные и технологические системы», СПб, СПбГПУ, 2010; Научно-техническом семинаре кафедры «Транспортные и технологические системы», СПб, СПбГПУ, 2011.

Публикации.

Основное содержание работы изложено в 5 печатных работах, в том числе в 2-х статьях, изданных в журналах, входящих в список ВАК РФ. Библиографический список основных работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы.

Работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов и списка литературы из 97 наименований, изложена на 105 страницах, включая: 5 таблиц и 19 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследования, поставлены основные задачи. Показана научная новизна и практическая значимость проделанной работы.

В первой главе проведен краткий обзор известных конструкционных полимерных материалов, которые могут быть использованы в узлах трения. Показано, что в сравнении с металлическими сплавами вместе с рядом преимуществ им свойственен и ряд недостатков. Например, относительно низкая прочность, плохая теплопроводность, значительный коэффициент температурного расширения и разбухание в жидких средах. Все это существенно ограничивает область их применения.

Во многом эти недостатки устраняются, если полимеры применять в виде тонкослойных покрытий, соединенных с металлической, обычно стальной, подложкой силами адгезии. Сцепление с подложкой устраняет возможность деформирования полимерного слоя, что обеспечивает ему прочность, такую же как у металла.

К сожалению, количество полимеров обладающих сочетанием хороших антифрикционных свойств со способностью создавать прочные адгезионные соединения не велико. В машиностроении по этим показателям наибольшее распространение получили полиамиды, которые к тому же обладают и хорошими технологическими свойствами.

Практика применения полимерных покрытий показала, что прочность адгезии существенно зависит от ряда внешних факторов. К ним в первую очередь относятся контактные давления и температура, которые могут приводить к ее временному обратимому изменению или к существенному необратимому снижению с течением времени. В современных методиках расчета металлополимерных узлов трения именно последний процесс не учитывается, что приводит к неожиданным разрушениям.

Также в первой главе был сделан обзор наиболее распространенных методов испытания адгезии и полученных с их помощью результатов по изучению влияния на нее технологических и эксплуатационных режимов, типа и состава вводимых наполнителей и т.д. Выбраны формы образцов и методика их нагружения, в том числе и в условиях сложного напряженного состояния и нагрева.

Обоснование используемой методики базируется на анализе аналогичных работ других исследователей, внесших огромный вклад в изучение возможностей антифрикционных полимерных покрытий. Прежде всего, это академик Белый В.А. и его многочисленная научная школа, такие ученые как Басин И. В, Башкарев А.Я., Берлин А. А., Букреев В.В., Стукач А.В., Шестаков Б.М. и многие другие.

Во второй главе представлены результаты исследования влияния на адгезионную прочность температуры и давления, которое всегда присутствует в узле трения со стороны контртела. Особенность испытания состояла в том, что использовались два вида образцов. В одном случае испытания проводились на отрыв и сдвиг, в другом только на отрыв покрытия от металлической подложки.

Все исследования проводились с полиамидными материалами, которые в виде мелкодисперсных порошков наносились на предварительно нагретые стальные подложки (Ст 3).

В результате было установлено, что с повышением давления, адгезионная прочность соединения полиамид-металл на сдвиг существенно

возрастает, причем влияние давления может быть описано эмпирической зависимостью

$$[\tau]_q = [\tau]_0 + a \cdot q^c \quad (1)$$

Здесь $[\tau]_0$ – адгезионная прочность без давления, a и c – константы полимерного материала, q – контактные давления. Для исследованных материалов было установлено: $a = 3$, $c = 0,53$.

При введении наполнителей изменяется начальное значение адгезионной прочности $[\tau]_0$, а значения констант a и c сохраняются. Повторное циклическое нагружение образцов контактными давлениями на величину адгезионной прочности $[\tau]_0$ не влияло.

В исследованиях выполненных ранее А.Я. Башкаревым было установлено, что между прочностью адгезии на сдвиг и на отрыв существует зависимость $[\sigma] = 0,7 \cdot [\tau] \pm 5\%$ которая сохраняется при любых давлениях.

Также во второй главе приведены результаты исследования зависимости адгезионной прочности от температуры. Опубликованные другими авторами результаты исследований многократно подтверждали, что с повышением температуры адгезия полимеров существенно снижается. Однако применительно к полиамидам, используемым в узлах трения, четкой информации по этому вопросу встречается мало. Поскольку нагрев является лишь одним из факторов, действующих на адгезионное соединение и должен изучаться в комплексе, в данной работе его влияние было изучено применительно к исследованному материалу. В результате была получена зависимость, описывающая обратимое снижение адгезионной прочности с повышением температуры, которое, однако, исчезает с охлаждением образцов.

$$[\tau]_T = [\tau]_H - h \cdot (T - T_H) \quad (2)$$

здесь $[\tau]_T$ – адгезионная прочность при повышенной температуре; $[\tau]_H$ – адгезионная прочность при нормальной температуре; T и T_H – повышенная и нормальная температура соответственно; h – коэффициент пропорциональности. Для различных по составу покрытий коэффициент $h = 0,14 - 0,45$ МПа/°К.

В третьей главе описываются результаты испытания адгезионной прочности полиамидных покрытий, модифицированных фуллереном C_{60} .

Постановка данной задачи возникла в связи с тем, что появился целый ряд работ, в которых достаточно убедительно показано положительное влияние фуллеренов на антифрикционные свойства многих полимеров, в том числе и полиамидов. Поэтому закономерным был вопрос и об изучении их влияния на адгезионную прочность.

Актуальность данного вопроса обоснована также и тем исключительным вниманием, которое в настоящее время обращается на поиск эффективного применения наноматериалов, в том числе в машиностроении.

На основе опубликованных работ, относящихся к физике строения фуллереном C_{60} , была проанализирована перспектива его добавки в структуру полиамида. В работах, направленных на изучение процессов трения, подобных подходов практически не встречается.

Были найдены работы, в которых показана возможность химического соединения фуллеренов с полиамидами, что учитывая термостабильность структуры фуллеренов, должно положительно повлиять на физико-механические свойства композита.

Исследование проводилось для двух марок полиамида: ПА-6 и ПА-11. Была разработана специальная методика смешения их порошков с малыми концентрациями фуллерена C_{60} (от 0 до 1 % по массе). Для этого фуллерен растворялся в толуоле в заданной пропорции, а затем полиамидный порошок смешивался с раствором и высушивался.

Влияние фуллерена представлено на рисунке 1 и в таблице 1.

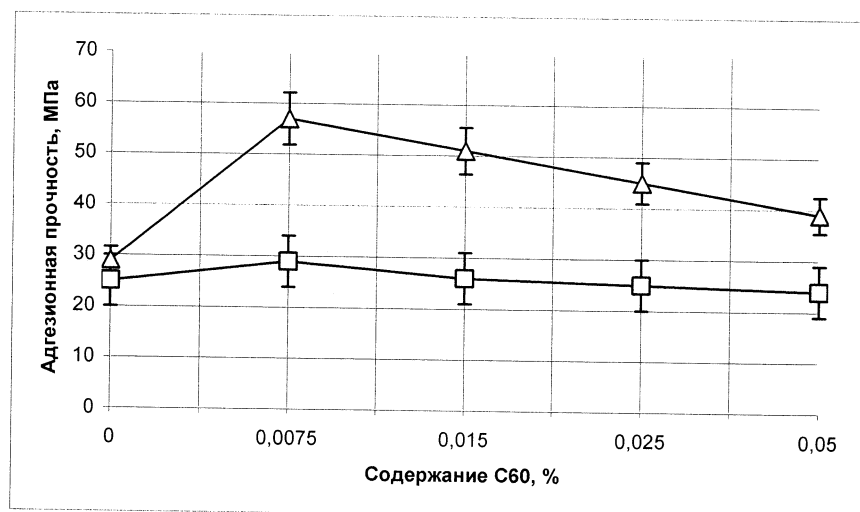


Рис. 1. Зависимость адгезионной прочности полиамида ПА-6 от процентного содержания в нем фуллерена C_{60} . Температура нанесения покрытий 573 °К, скорость нагружения 0,2 МПа/сек. Δ – испытания при температуре 293 °К; \square – испытания температуре 353 °К.

Анализ полученных результатов показал, что оптимальное содержание фуллерена в полиамиде с точки зрения адгезионной прочности лежит в пределах 0,0075 – 0,015 %. При этом эффект имеет место только при нормальной температуре испытания. При повышенной, наиболее интересной с точки зрения эксплуатации узлов трения, ни положительного, ни отрицательного влияния добавки фуллерена C_{60} обнаружено не было.

Таблица 1. Влияние добавки фуллерена C_{60} на прочность адгезии.

Материал ПА-11, содержание добавки C_{60} , %	Температура нанесения покрытий, °С			
	280		320	
	Темп. испытания, °С		Темп. испытания, °С	
	22	83	22	83
Без добавки	34	28	38	28
0,015	37	28	35	26

Как видно из таблицы 1, для полиамида ПА-11 какого-либо существенного влияния добавки фуллерена C_{60} также обнаружено не было.

В четвертой главе представлены исследования долговечности адгезионного соединения полимерного покрытия с металлической

подложкой, которые базируются на рассмотрении деструкции полимера и его соединений с металлом с позиции термофлуктуационной теории прочности, сформулированной академиком Журковым С.Н. При этом технологическая фаза образования адгезионных связей в результате появления активных радикалов при термодеструкции полимера представляется как часть периода их существования. Ее небольшая продолжительность протекает в условиях активной деструкции не только молекул полимера, но и их адгезионных связей с металлической подложкой. В результате теплового воздействия при нанесении покрытия, его адгезионная прочность возрастает, а ее стабильность в условиях эксплуатации падает.

Разрушение соединения покрытия с подложкой описывается моделью, которая включает два процесса. Первый – постепенная деструкция адгезионных связей, то есть разупрочнение, и второй – мгновенное разрушение ослабленного соединения под действием касательных напряжений, возникающих под действием сил трения.

Таким образом, согласно термофлуктуационной теории прочности и с использованием критерия Бейли, продолжительность службы адгезионного соединения полимерное покрытие – металлическая подложка t_* рассчитывается по формуле

$$\int_0^{t_*} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a - \gamma \sigma(t)}{RT(t)}} = 1 - \frac{\sigma_*}{[\sigma]} \quad (3)$$

Где u_a – энергия активации процесса разрушения адгезионных связей, γ – коэффициент чувствительности материала к действию механической нагрузки; $[\sigma]$ – начальная адгезионная прочность в условиях контактного давления и рабочей температуры; σ_* – действующие

напряжения в момент t_* ; T – температура эксплуатации в градусах Кельвина; R – универсальная газовая постоянная.

В диссертации была разработана методика экспериментального определения u_a , γ , $[\sigma]$ и u_n - энергии активации процесса разрушения самого полимера. Для этого были использованы образцы, схема нагружения которых изображена на рисунке 3. Их форма в отличие от склеенных пластин позволяла полностью соответствовать условиям формирования и работы реального покрытия.

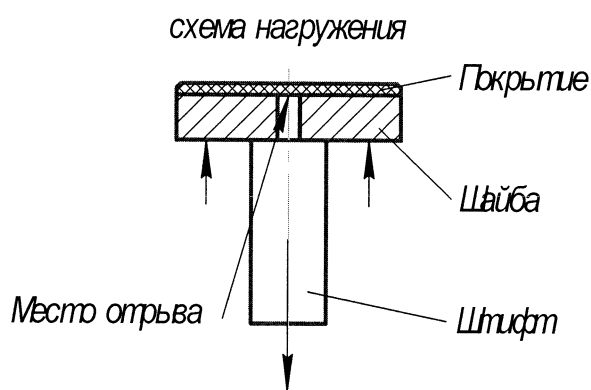


Рисунок 3. Образец штифтового метода испытания и схема его нагружения.

Представив продолжение жизни адгезионного покрытия в виде двух последовательных этапов: технологического $0 - t_0$ и эксплуатационного $t_0 - t_*$, было получено выражение

$$1 - \int_0^{t_0} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT(t)}} + \int_0^{t_0} \frac{d\psi}{\tau_0 \exp \frac{u_n}{RT(t)}} + \int_{t_0}^{t_*} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a - \gamma\sigma}{RT}} = 1 - \frac{\sigma}{[\sigma]} \quad (4)$$

Которое в условиях постоянной технологической и эксплуатационной температур принимает вид

$$\frac{t_0}{\tau_0 \exp \frac{u_n}{RT_0}} \left(1 - \frac{t_0}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT_0}} \right) + \frac{t_* - t_0}{\tau_0 \exp \frac{u_a - \gamma\sigma}{RT}} = 1 - \frac{\sigma}{[\sigma]} \quad (5)$$

Где t_0 – продолжительность технологического процесса; T_0 – температура нанесения покрытия температуре; T – температура эксплуатации.

Из представленного выражения определяется значение времени t_* , то есть момента разрушения адгезионного соединения.

Также в четвертой главе на основе анализа работ предшествующих авторов предлагается формула для расчета контактных напряжений в узле трения с полимерным покрытием и данные о значении коэффициента трения для расчета касательных напряжений.

На основе полученных и представленных выше зависимостей предлагается следующая методика расчета покрытия на его адгезионную прочность.

1. Задаются геометрические размеры узла и температура, при которой он работает (очевидно, максимально допустимая температура для смазки).
2. По предложенной формуле рассчитываются максимальные контактные давления q_{\max} и напряжения от силы трения $f \cdot q_{\max}$.
3. По результатам выполненных исследований определяется адгезионная прочность при заданной температуре T и контактных давлениях q_{\max} .

$$[\tau] = [\tau]_T - h \cdot (T - T_H) + a \cdot q_{\max}^c \quad (6)$$

4. По представленной выше формуле устанавливается расчетная продолжительность службы адгезионного соединения полимерное покрытие – металлическая подложка для соответствующих значений температуры и нагрузок.

5. При неудовлетворительном результате изменяются геометрические размеры узла или режимы технологии.

Выполненный расчет дает ответ на вопрос о возможности использования антифрикционного полимерного покрытия в конкретном узле, как альтернативы цветным антифрикционным сплавам.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Выполненные исследования дали возможность получить следующие научные результаты и сделать выводы.

1. Разработана, обоснована и апробирована методика расчета адгезионной прочности антифрикционного полимерного покрытия, которая базируется на представлении процесса работы адгезионного соединения «полимерное покрытие – стальная подложка» в виде двух последовательных этапов: кратковременного технологического, протекающего при экстремальных условиях, и продолжительного эксплуатационного под действием рабочих нагрузок.

2. Для практического использования термофлуктуационной теории прочности применительно к расчетам долговечности адгезионного соединения предложен способ определения энергии активации разрушения и коэффициента, отражающего чувствительность материала к механическим напряжениям. Особенность способа заключается в том, что для повышения достоверности результатов, испытания могут проводиться при одном значении температуры.

3. Применительно к антифрикционным полимерным композициям, исследовано влияние на адгезионную прочность полимер-сталь величины

контактных давлений и температуры во время действия нагрузки. В разработанной методике расчета оба эти фактора учитываются.

4. Проведенные исследования полиамидных покрытий с добавкой фуллерена C_{60} показали, что существенного изменения адгезионной прочности у данных композиций нет. И рекомендации по их применению могут учитывать лишь положительный эффект с точки зрения антифрикционных и износостойких свойств.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. Иванов С.А., Башкарев А.Я. Улучшение адгезии полиамидов к металлам путем их модификации фуллереном C_{60} ; XXXVII Неделя науки СПбГПУ. Материалы всероссийской межвузовской конференции студентов и аспирантов. – СПб.: Издательство Политехн. ун-та, 2008. – стр.135;

2. Федотова А.С., Степанов К.Н., Иванов С.А. и др. Влияние наноматериалов на адгезионные свойства композитов/ XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. IV. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – с. 170-171.

3. Иванов С.А., Забиров А.Г. Адгезия полиамида к металлам. – Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. Материалы 11-й международной научно-практической конференции, 2009, с. 335.

4. Иванов С.А., Башкарев А.Я. О долговечности и прочности композитов/ Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб., 2010. – №4 (110): Наука и образование. – с. 196 – 199.

5. Веттегрень В.И., Иванов С.А., Мамалимов Р.И. Деформация химических связей в молекулах покрытия из полиамида 6 на поверхности стали/ Журнал технической физики, 2011, том 81, выпуск 10. – с. 107 – 113.