

G.V. Tsvetkova, G.V. Ivanova, E. Mohseni, M. Al-Najjar, Y. Naghawi  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
Saint Petersburg, Russia, tsvetkova\_gv@mail.ru

## MULTIFACTOR ANALYSIS OF TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF COATING MATERIALS

### Abstract

The study is aimed at studying the dependence of the tribological characteristics of coating materials on the method of their manufacture and the resulting properties. In the experiment, layers of various materials were applied to 45 steel using automatic electric arc surfacing, and laser technologies were also used. A study of tribological characteristics has shown the advantages of laser surfacing for gas turbine engine blades. For electric arc surfacing, it is recommended to use surfacing with ceramic flux to improve the quality of faucet parts. Metallographic studies have shown a structural relationship between wear resistance and grain size in the material, as well as microhardness.

Key words: surfacing, wear resistance, microhardness, grain size, alloying elements.

УДК 678

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-245

А.Я. Башкарев, В.Ю. Бессонова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, bessonova.viktoria@yandex.ru

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОЛИАМИДНЫХ ПОКРЫТИЙ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ

### Аннотация

Обосновывается возможность применения термофлуктуационной теории прочности для прогнозирования долговечности антифрикционных полиамидных покрытий. Рассмотрены причины их разрушения в узлах трения. Предложен способ снижения отрицательного действия остаточных напряжений при нанесении полимеров на внутренние поверхности втулок.

*Ключевые слова:* узлы трения, полиамидные покрытия, металлическая подложка, адгезия

### Введение

Конструкционные полимерные материалы, обладая целым рядом технологических и потребительских преимуществ перед металлами, значительно уступают им по прочности. Отрицательным фактором, например, в узлах трения становится плохая теплопроводность, что приводит к их перегреву, при котором прочность полимеров значительно снижается. Одновременно из-за большого коэффициента теплового расширения происходит уменьшение или даже полное исчезновение необходимых для работы монтажных зазоров [1-4].

В свое время как выход из этого положения стало применение полимеров в виде тонкослойных покрытий, нанесенных на металлическую подложку.

Антифрикционные полимерные материалы обладают хорошей износостойкостью, поэтому достаточно небольшой толщины полимерного слоя, чтобы обеспечить продолжительный рабочий ресурс. Но к полимерному материалу предъявляется особое обязательное требование – обеспечение долговечного адгезионного соединения с металлом подложки, чаще всего, это сталь. Кроме того, к полимеру предъявляется и ряд технологических требований с точки зрения возможности образовывать тонкослойное покрытие. Как показали исследования и практический опыт, в наибольшей степени таким требованиям отвечают полиамиды, относящиеся к группе термопластов [5-7].

Самым простым и распространенным способом нанесения полиамидных покрытий стал метод погружения детали, предварительно нагретой до температуры, превышающей температуру плавления полимера, в псевдооживленный воздушным потоком полиамидный порошок. После оплавления его частиц и последующего охлаждения вместе с ним детали, на ее поверхности образуется определенной толщины слой, который затем протачивается или шлифуется до требуемой толщины.

Простота технологического процесса, к сожалению, сыграла и отрицательную роль в расширении масштабов практического применения тонкослойных полимерных антифрикционных покрытий. Дефицит запасных деталей и узлов при восстановлении строительной, дорожной, сельскохозяйственной техники приводил к спешному их восстановлению с помощью полимеров без достаточно продуманного применения. Самым слабым местом полимерных покрытий оказалась долговечность их соединений с металлической подложкой, т.е. отслоение покрытий. В результате наступил период сомнений и разочарований в новых технологиях, что вызвало непродуманный отказ от них. Представляемая работа – объяснение причин этого явления и также предложение методов их устранения [8].

### Методы и материалы

Большое значение в изучении процесса возникновения и разрушения адгезионного полимерного соединения сыграло рассмотрение этих процессов с позиции термофлуктуационной теории прочности. Известно, что адгезионные соединения, т.е. их дискретные связи различных по природе материалов возникают в результате проявления физических сил, чаще всего Ван-дер-Ваальсовых, и образования химических связей. Наибольшей энергией обладают химические связи, которые возникают как результат появления у полимера активных радикалов в результате термодеструкции его молекул. Естественно предположить, что при достаточно прочной адгезионной связи разрушение может происходить уже по самой молекуле, т.е. ее внутренние связи должны сами иметь достаточно большую энергию. Таким образом, чтобы говорить о долговечности адгезионных соединений, нужно оценивать энергию активации разрушения адгезионных связей  $u_a$  и энергию разрушения самих молекул полимера  $u_n$ . От этого будет зависеть, адгезионный или когезионный вид разрушения имеет место [9].

Каноническая формула разрушения твердых материалов с позиции термофлуктуационной теории прочности, выведенная академиком Журковым С.Н., записывается в виде:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{u - \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T} \quad (1)$$

где  $\tau$  – долговечность материала (с),  $\tau_0$  – предэкспотенциальный множитель равный  $10^{-11}$ - $10^{-13}$  с,  $u$  – энергия активации процесса разрушения (кДж/моль),  $\gamma$  – коэффициент чувствительности материала к механическим напряжениям ( $\frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{МПа}}$ ),  $\sigma$  – механические напряжения (МПа),  $R$  – газовая постоянная ( $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ ),  $T$  – температура (К).

Формула Журкова при переменных напряжениях (нагрузках) и температуре записывается в виде критерия Бейли:

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u - \gamma \cdot \sigma(t)}{R \cdot T(t)}} = 1 \quad (2)$$

Применительно к расчету на прочность адгезионного соединения было выдвинуто предположение, что его разрушение происходит в два этапа. В начале в результате термодеструкции происходит уменьшение адгезионных связей, образовавшихся при нанесении на металлическую подложку полимерного слоя, т.е. происходит постепенное снижение адгезионной прочности. Затем, когда ее остаточное значение оказывается равным действующим напряжениям, например, в подшипниках скольжения они возникают как результат сил трения, происходит практически мгновенное отслаивание полимера от металлической подложки, т.е. полное разрушение узла трения. Момент наступления перехода от одного этапа ко второму соответствует его долговечности.

В результате предлагается критерий Бейли для адгезионного соединения записывать в виде:

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a - \gamma_a \cdot \sigma(t)}{R \cdot T(t)}} = 1 - \frac{\sigma}{[\sigma]}, \quad (3)$$

где с учетом малой толщины покрытия можно принимать  $\sigma = f \cdot \sigma_k$ ;  $f$  – коэффициент трения скольжения;  $\sigma_k$  – максимальное значение контактных напряжений.

Возникает вопрос о методике расчета контактных напряжений  $\sigma_k$  в узле, где контактируют металлические и полимерные материалы.

Исследуя напряженное состояние полиамидных втулок в подшипниках скольжения, В.А. Раевский показал, что при описании их напряженного состояния следует исходить из того, что коэффициент Пуассона полиамида равен 0,5, т.е. он фактически не сжимаемый материал, а деформация его под нагрузкой происходит лишь за счет перераспределения материала [10]. При нагружении тонкого полиамидного покрытия, толщина которого менее одного миллиметра, соединённого с металлической поверхностью, расчет контактных напряжений можно проводить без учета его пластической деформации по классической теории расчета, например, по формулам Герца-Беляева. Это допущение было проверено с помощью емкостных датчиков в виде полосок из металлизированного лавсана, установленных в зоне контакта втулки и вала [11-13].

Контактные давления и касательные напряжения от сил трения — это не единственные причины, снижающие долговечность полимерных нагрузок. Кроме них существуют, так называемые внутренние напряжения, которые возникают в

результате разных коэффициентов теплового расширения металла подложки (сталь) и полимера покрытия, которые различаются примерно в 6-10 раз в зависимости от степени кристаллизации полимера [14-15]. Однако хорошее релаксационное свойство термопластов приводит к снижению возникающих напряжений. В значительной мере этому способствует влаго- и масло-поглощение полимеров. Но самая большая угроза для покрытий возникает в самом начале нанесения полимеров на внутренние поверхности втулок (рисунок 1).

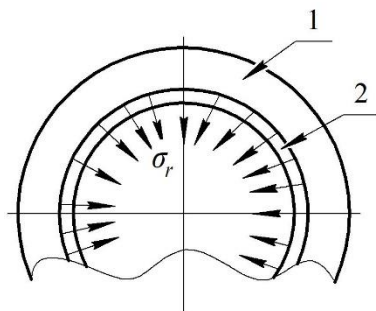


Рисунок 1: 1 – металлическая втулка, 2 – полимерное покрытие,  $\sigma_r$  – радиальные внутренние напряжения

Температура плавления полиамидов в зависимости от количества амидных групп в их молекулах находится в пределах 180-280 °С. Чем выше температура плавления, тем более устойчивы против термодеструкции и полимер и его адгезия. Деталь перед нанесением покрытия должна быть нагрета значительно выше температуры плавления полимера. Это необходимо для появления достаточного количества активных радикалов, необходимых для формирования адгезионного соединения. Температура нанесения полимера подбирается опытным путем в зависимости от металлоемкости детали, площади ее поверхности, способа нанесения полимера и его марки. Опыт показывает, что эта температура должна быть на 30-50 °С выше его температуры плавления.

После полного расплавления на внутренней поверхности втулки начинается процесс ее охлаждения. Вся его сложность состоит в том, что полимер в отличие от металлов не переходит в твердое состояние сразу по всему объему. Это явление объясняется его низкой теплопроводностью. Если процесс происходит неуправляемо, то наружный слой полимера на втулке охлаждается быстрее чем тот, который контактирует с нагретым металлом. Он раньше затвердевает. В нем возникают напряжения, включая радиальные, которые направлены на отрыв его от подложки. Известно, что адгезионная прочность имеет обратную зависимость от температуры. В результате покрытие либо сразу полностью отслаивается от металла, либо его адгезия оказывается низкой прочностью.

Выходом из такого положения может быть направленное охлаждение втулки (рисунок 2).

Сразу после расплавления полимера на внутренней поверхности втулки 1 она закрывается с обеих сторон крышками 4, устанавливается в струбцину 3, крышки закрепляются винтом 5. После этого вся конструкция погружается в резервуар 2 с охлаждающей жидкостью.

Благодаря такому процессу полимер охлаждается и затвердевает раньше со стороны металла и только потом он весь переходит в твердое состояние. В результате сначала формируется адгезионное соединение и только после этого появляются опасные внутренние радиальные напряжения.

Таким образом, чтобы наносить антифрикционные покрытия на внутренние

поверхности нужно использовать такую технологию, при которой они наносятся только на заданную поверхность и максимально тонким слоем, т.к. благодаря высокой износостойкости не толщина полиамидного слоя лимитирует срок его службы, а долговечность адгезии.

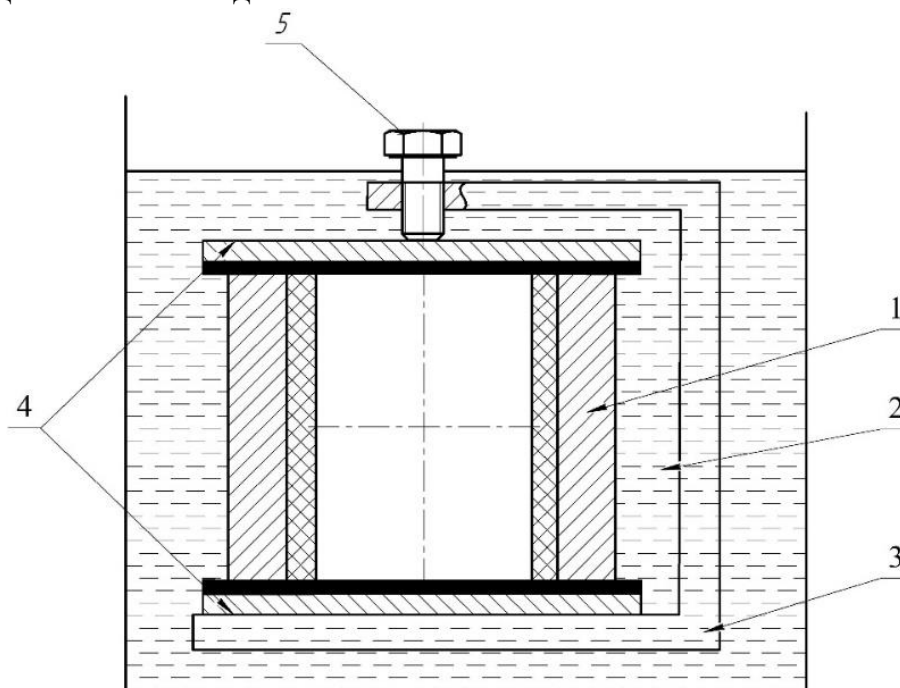


Рисунок 2 – Схема направленного охлаждения втулки с внутренним полимерным покрытием: 1 – втулка, 2 – резервуар с охлаждающей жидкостью, 3 – трубка, 4 – крышки с прокладками, 5 – зажимной винт.

Антифрикционные полиамиды всегда используются в композите с другими веществами, которые улучшают их эксплуатационные свойства: снижается коэффициент трения, повышается износостойкость и прочность, улучшается теплопроводность [16-17]. Поскольку технология нанесения полимерных покрытий чаще всего создается с применением порошковых материалов, наполнители тоже применяют в виде порошков, например, графита, дисульфида молибдена, талька, медных сплавов [18-19].

Как говорилось выше, разрушение полимерного композита имеет две формы: адгезионную, когда связь полимера с металлической подложкой или наполнителями разрушается, и когезионную – разрушение происходит по самому полимеру. Согласно термофлуктуационной теории прочностными критериями долговечности адгезии являются энергии активации разрушения адгезионных связей  $u_a$  и их чувствительности к механическим напряжениям  $\gamma_a$ .

Аналогично, если происходит когезионное разрушение критериями долговечности оказываются  $u_n$  – энергия разрушения полимера и  $\gamma_n$  – энергия чувствительности его к механическим напряжениям.

Если будут известны величины  $u_a$  и  $u_n$ , то можно определить температурно-временной режим нанесения полимерного покрытия, при котором достигается максимальная прочность адгезионного соединения полимерного покрытия с металлической подложкой.

Уже отмечалось, что возникновение дисперсных адгезионных связей — это результат возникновения активных радикалов при термодеструкции молекул полимера.

Но образовавшиеся адгезионные связи тоже подвержены термодеструкции.

Таким образом происходят параллельно два процесса: образование адгезионных связей и их разрушение. В работе [20] было получено математическое выражение, определяющее количество сохраняющихся адгезионных связей при постоянной температуре  $T$  на момент времени  $\tau$ :

$$N = k \cdot \frac{\tau}{\tau_0 \exp \frac{u_n}{RT}} \cdot \left( 1 - \frac{\tau}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT}} \right), \quad (4)$$

где  $k < 1$  – коэффициент, учитывающий долю появившихся радикалов, которая образует адгезионные связи. Методика его определения проста и разработана, но по требованиям краткости изложения пока не приводится.

Продолжительность  $\tau_*$  технологического процесса нанесения полимерного покрытия, когда сохраняется максимальное количество из числа образовавшихся адгезионных связей, можно рассчитать, приравняв первую производную по времени к нулю. В результате можно прийти к выражению

$$u_a = RT(27,6 + \ln \tau_*). \quad (5)$$

Если экспериментально построить график зависимости прочности склейки металлических образцов определённых марок стали и полиамида при температуре  $T$ , то определив момент  $\tau_*$  наступления максимальной прочности, можно рассчитать энергию активации ее процесса разрушения.

Применительно к поликапроамиду и металлическим образцам из стали 5 было установлено, что  $u_a = 130$  кДж/моль.

Второй вопрос в теории долговечности полимерных антифрикционных покрытий это их износостойкость, которая почти полностью зависит от энергии активации разрушения молекулярных и межзатомных связей полимера  $u_n$ . Для ее определения может быть применена следующая методика.

Полимер наносится на стальную подложку нагретых образцов при двух разных температурах  $T_1$  и  $T_2$  с последующей выдержкой их склейки при этих же температурах в термостате в течение некоторого времени  $\tau$ . Затем после охлаждения испытывается адгезионная прочность их соединения.

Форма образцов и методы их склеивания бывают довольно многообразными. В данной работе использовались образцы, изображенные на рисунке 3.

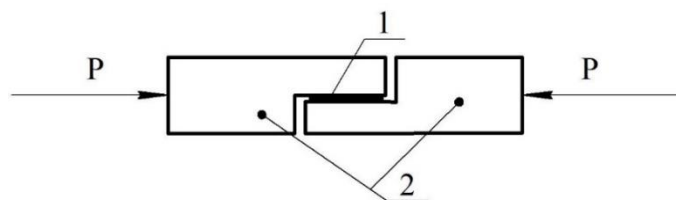


Рисунок 3 – Нагружение сдвигающей нагрузкой  $P$  склеенных полимером 1 стальных образцов 2

Графики зависимости адгезионной прочности от времени термостатирования представлены на рисунке 4.

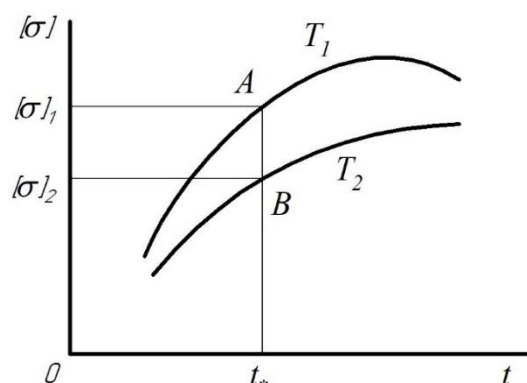


Рисунок 4 – Изменение адгезионной прочности соединения

При одинаковой выдержке адгезионная прочность  $[\sigma]_1$  и  $[\sigma]_2$  при температуре  $T_1$  и  $T_2$  согласно формуле (4):

$$[\sigma]_1 = \frac{t_*}{\tau_0 \exp \frac{u_n}{RT_1}} \left(1 - \frac{t_*}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT_1}}\right) \quad (6)$$

$$[\sigma]_2 = \frac{t_*}{\tau_0 \exp \frac{u_n}{RT_2}} \left(1 - \frac{t_*}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT_2}}\right) \quad (7)$$

Отсюда можно получить уравнение:

$$\frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2} = \frac{\left(1 - \frac{t}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT_1}}\right) \cdot \tau_0 \exp \frac{u_n}{RT_2}}{\left(1 - \frac{t}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT_2}}\right) \cdot \tau_0 \exp \frac{u_n}{RT_1}} \quad (8)$$

После логарифмирования получается выражение для определения  $u_n$

$$u_n = \frac{\ln\left(1 - \frac{t_*}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT_1}}\right) - \ln\left(1 - \frac{t_*}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT_2}}\right) - \ln \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2}}{\frac{1}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} \quad (9)$$

Этот метод не требует многочисленных экспериментов, необходимых для построения графиков  $[\sigma]=f(t)$ . Достаточно экспериментально определить прочность адгезии через одно и то же время  $t_*$  при двух разных температурах термостатирования.

### Результаты и обсуждение

Самое уязвимое место антифрикционных полимерных покрытий в узлах трения – это их адгезионное соединение с металлической подложкой. Положительное в том, что, обладая высокой износостойкостью, они могут применяться с небольшой толщиной слоя в пределах 0,2-0,3 мм. Благодаря этому обеспечивается достаточно хороший отвод выделяемого при трении тепла, стабильно сохраняются монтажные зазоры, а благодаря адгезии с металлической подложки обеспечивается высокая прочность полимерного слоя.

Однако до последнего времени не созданы апробированные методы расчета тонкослойных покрытий на долговечность.

В представляемой работе выдвинут новый взгляд на процесс образования адгезионного соединения полимерных покрытий из термопластов и его деструкцию, которая происходит уже в процессе создания покрытия и затем при дальнейшей службе узла трения.

Разработана математическая модель, описывающая два параллельно происходящих с разной скоростью процесса: образования адгезии и ее разрушения.

Такой подход реализуется с позиции термофлуктуационной теории прочности согласно, которой критериями прочности самого полимера и его адгезионных соединений являются не пределы прочности, а энергия активации процессов их разрушения.

Предложена новая технология нанесения антифрикционных покрытий из термопластов на поверхности с отрицательным радиусом кривизны, без применения которой этот процесс практически невозможен.

Благодаря применению термофлуктуационной теории прочности могут быть созданы алгоритмы компьютерных программ для практического применения термофлуктуационной теории разрушения применительно к полимерным композитам.

### **Заключение**

1. Обоснована возможность создания методики расчета на долговечность адгезионного соединения тонкослойных антифрикционных покрытий из полиамидов с металлической подложкой.

2. Разработаны методики определения критериев долговечности соединения "термопласт-металл", что позволяет определять слабые места адгезионного соединения.

3. Раскрыта причина разрушения адгезионного соединения полимера с металлической поверхностью при отрицательном радиусе ее кривизны. Предложен способ устранения этой причины.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Владимирская Н.Б., Сухоленцев Э.А., Сухоленцева Т.В. Применение полимерных композиций в узлах трения // Известия ВУЗОВ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ. -2008. Спец.выпуск.

2. Трение и износ материалов на основе полимеров / [В. А. Белый, А. И. Свириденко, М. И. Петроковец, В. Г. Савкин]; АН БССР, Ин-т механики металлополимерных систем. - Минск: Наука и техника, 1976. - 431 с.

3. Серкова Е.А., Хмельницкий В.В., Застрогина О.Б. Полимерные материалы для антифрикционных покрытий //Труды ВИАМ. -2021. -№ 5(99). -С.56-63

4. Кузнецов А. А. Конструкционные термопласты как основа для самосмазывающихся полимерных композиционных материалов антифрикционного назначения / А. А. Кузнецов, Г. К. Семенова, Е. А. Свидченко // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 1(57). – С. 116-126.

5. Гвоздев А.А. Опыт и перспективы использования металлополимерных композиций в узлах трения машин и оборудования// Межвуз.сб.науч.тр. «Физика, химия и механика трибосистем». - Иваново: ИвГУ, 2008. -С.80 – 89

6. Дерлугян Ф. П. Композиционный полимерный тонколистовой материал (КПТМ) для работы в трибосопряжениях при экстремальных условиях / Ф. П. Дерлугян // Инженерный вестник Дона. – 2007. – № 2(2). – С. 4-14.



7. Голопятин А. В. Нанесение полимерных покрытий в узлах сухого трения сельскохозяйственных машин / А. В. Голопятин // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе - сегодня и завтра: сборник тезисов докладов междунар. науч.-практ. конф., 21-22 декабря 2017 г. - Гомель, 2017. - С. 61-62.

8. Долговечность соединений деталей машин с полиамидными покрытиями в узлах трения строительной техники / А. Я. Башкарев, В. В. Букреев, А. В. Кущенко, А. В. Стукач // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2016. – № 5. – С. 340-349.

9. Веттегрень В.И., Иваньков С.А., Мамалимов Р.И. Деформация химических связей в молекулах покрытия из полиамида 6 на поверхности стали// Журнал технической физики. -2011. –Т. 81. -вып. 10. - С. 107-113.

10. Раевский А.Н. Полиамидные подшипники: (Расчет и проектирование). - Москва: Машиностроение, 1967. - 139 с.

11. Штаерман И. Я. Контактная задача теории упругости. М.-Л.: Гостехиздат, 1949. 270 с.

12. Гонца В. Ф. Влияние слабой сжимаемости на решение задач теории упругости для несжимаемого материала. — В кн.: Вопросы динамики и прочности. 1970, - вып. 20. - С.181-195 (Рига).

13. Шестаков В.М. Работоспособность тонкослойных полимерных покрытий. Москва: Машиностроение, 1973. - 160 с.

14. Кочнев А. М., Галибеев С. С. Модификация полимеров : Конспект лекций / А. М. Кочнев, С. С. Галибеев; М-во образования Рос. Федерации, Казан. гос. технол. ун-т. - Казань: Изд-во КГТУ, 2002. - 179 с.

15. Гвоздев А.А. Технология повышения долговечности узлов трения при ремонте сельскохозяйственной техники с использованием модифицированных полимерных композиций: диссертация доктора технических наук: 05.20.03 Москва: 2010 г.

16. Раскутин А. Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов / А. Е. Раскутин // Авиационные материалы и технологии. -2017. - № 5. - С. 344-348.

17. David L.B., Gregory W.S. A low friction and ultra low wear rate PEEK/PTFE composite // Wear. -2006. -V. 261. -P. 410–418.

18. Башкарев А.Я., Веттегрень В.И., Лебедев А.А., Барсуков А.В. Исследование механизма износа антифрикционного полиамидного покрытия в модели узла трения транспортных машин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. -2006. -№ 2. -С. 119-128

19. Кущенко, А. В. Исследование коэффициента трения покоя полиамидного покрытия по стали / А. В. Кущенко, А. Я. Башкарев, В. Ф. Корелин // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 1-1. – С. 42-46

20. Рудской А.И., Башкарев А.Я., Бессонова В.Ю. Применение термофлуктуационной теории прочности для расчета долговечности адгезионных соединений на примере гранитно-битумных композитов// Современное машиностроение. Наука и образование. -2023. -№ 12. -С. 505-520.

A.Y. Bashkarev, V.Y. Bessonova  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
Saint Petersburg, Russia, bessonova.viktoria@yandex.ru

## IMPROVING THE QUALITY OF POLYAMIDE COATINGS IN FRICTION UNITS

### Abstract

The possibility of application of thermofluctuation theory of strength for predicting the durability of antifriction polyamide coatings is substantiated. The reasons of their destruction in friction units are considered. A method of reducing the negative effect of

residual stresses when applying polymers on the inner surfaces of bushings is proposed.

*Key words:* friction units, polyamide coatings, metal substrate, adhesion.

УДК 621.89

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-246

С.Ю. Мишаков, П.Н. Хопин  
Московский авиационный институт (МАИ),  
Москва, Россия, s.mishakov@mail.ru

## **ОЦЕНКА РЕСУРСА ФРИКЦИОННЫХ СОПРЯЖЕНИЙ С ТВЁРДОСМАЗОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ДЛЯ МЕХАНИЗМОВ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В УСЛОВИЯХ РЕВЕРСИВНОГО ДВИЖЕНИЯ**

### **Аннотация**

В данной работе проведено обобщение имеющихся результатов исследований триботехнических характеристик реверсивных механизмов с твёрдосмазочными покрытиями (ТСП), а также выполнен сравнительный анализ трибоиспытаний фрикционных сопряжений с суспензионными покрытиями фирмы Molykote и ТСП типа ВНИИ НП при однонаправленном и реверсивном вращательном движении.

*Ключевые слова:* твёрдосмазочные покрытия, реверсивное движение, вращательное однонаправленное движение.

### **Введение**

Работа посвящена исследованию процессов трения в реверсивных механизмах (РМ) и узлах. Конструкция данных узлов весьма разнообразна, однако принцип их работы сводится к одному – периодическое изменение направления вращательного или поступательного движения.

Поскольку рассматриваемые пары трения могут эксплуатироваться в широком диапазоне температур (до +400 °С) и давлений окружающей среды (от 0,1 МПа до глубокого космического вакуума), а также подвергаться интенсивному радиационному воздействию, то для обеспечения требуемых характеристик изделия (коэффициента трения, долговечности, износостойкости) применяются различные смазочные материалы.

Наиболее перспективными для данных условий считаются твёрдосмазочные покрытия (ТСП). Широкое распространение среди них получили ТСП на основе дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) с разными связующими компонентами [1-11]. Их можно применять как в условиях высокого вакуума, так и в сухих средах и использовать в космической технике, что является всё более актуальным фактором, поскольку требования к срокам пребывания техники в космосе постоянно растут.

В настоящее время существует множество различных методов расчёта геометрических и кинематических параметров подобных механизмов, в то время как оценка триботехнических показателей носит частичный, отрывочный характер, не позволяющий в полной мере оценить параметры механизма до его изготовления и применения.

### **Методы и материалы**

Для сравнительного анализа фрикционных сопряжений с ТСП типа ВНИИ НП