

УДК 621.893

doi:10.18720/SPBPU/2/id-122

А.И. Рудской<sup>1</sup>, А.Я. Башкарев<sup>2</sup>, В.Ю. Лебедева<sup>3</sup>

## НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ В ПОДШИПНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ



<sup>1</sup>Андрей Иванович Рудской,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812)552-6757, E-mail: [rector@spbstu.ru](mailto:rector@spbstu.ru)



<sup>2</sup>Альберт Яковлевич Башкарев,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: 8(921)950-3715, E-mail: [bashkarev@spbstu.ru](mailto:bashkarev@spbstu.ru) .



<sup>3</sup>Виктория Юрьевна Лебедева,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: 8(931)292-4945, E-mail: [bessonova.viktoria@yandex.ru](mailto:bessonova.viktoria@yandex.ru).

### Аннотация

В связи с перспективностью применения в узлах трения тонкослойных полимерных покрытий обосновывается необходимость дополнительных исследований физико-механических свойств полиамидов, способных создавать прочные адгезионные соединения с металлической подложкой. Теоретически и экспериментально доказывается, что при расчете контактных напряжений в подшипниках скольжения при толщине полимерного слоя менее 1 мм его деформацию можно не учитывать.

*Ключевые слова:* узлы трения, подшипники скольжения, полимерные покрытия, контактные напряжения

## Введение

Особенность работы узлов трения тяжело нагруженных механизмов, например, строительных машин, таких как экскаваторы, дробильно-сортировочное оборудование и других, заключается в том, что для них характерны высокие нагрузки при относительно небольших скоростях скольжения. Автономность расположения затрудняет создание для них системы принудительной смазки, поэтому приходится применять консистентную смазку или материалы, способные работать в режимах сухого трения. Примеры таких узлов – это гусеничные тележки экскаваторов, ковшевые и транспортные цепи, шарниры рабочего оборудования и т.д.

Соединения, работающие в режимах пластической смазки и сухого трения, по величине контактных напряжений мало отличаются. Различие лишь в величине сил трения и соответствующей создаваемых ими касательных напряжений.

Для подшипников скольжения, где применяются монолитные полимерные втулки, расчет контактных напряжений разработан и не вызывает трудности. При этом деформация металлических частей в конструкции узла в расчет не принимается.

Главным разрушающим фактором узлов трения с антифрикционными полимерными вкладышами являются возникающие в них под воздействием рабочих нагрузок высокие контактные напряжения. Пропорционально им возрастает сила трения, повышается температура, что приводит к снижению прочности их соединения с металлической подложкой, если они применяются в виде антифрикционного покрытия.

Большинство термопластичных полимерных материалов, например, полиамиды, которые благодаря хорошим антифрикционным свойствам и способности образовывать прочные адгезионные соединения со многими металлами наиболее часто применяются в узлах трения в виде тонкослойных покрытий.

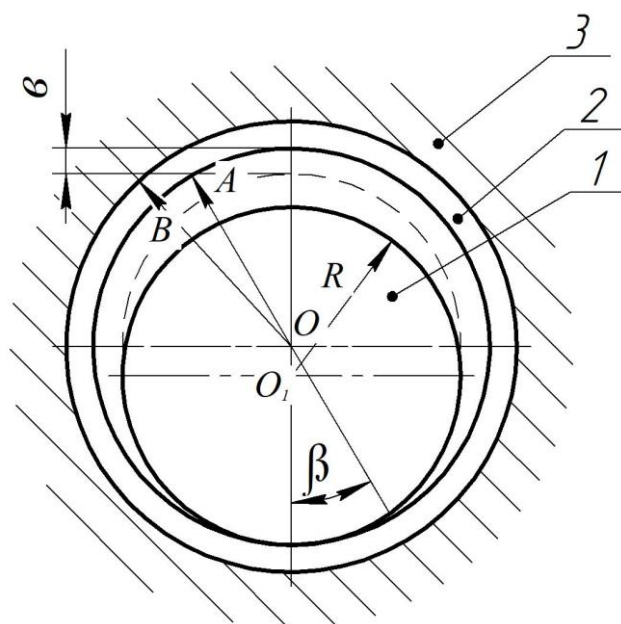
Благодаря малой толщине полимерного слоя улучшается отвод, выделяемого при трении тепла, уменьшается его деформация, снижается стоимость изготовления, особенно, если возникает необходимость применять уникальные дорогостоящие полимерные композиты. Особенно важна простота процесса нанесения покрытий, например с помощью мелкодисперсных полимерных порошков. Такую технологию можно применять в любых механических мастерских, что дает возможность восстанавливать изношенные поверхности деталей в непосредственной близости с местом эксплуатации механизмов, транспортирование которых связано с большими трудностями [1-4].

Естественно, возникает вопрос о несущей способности полимерного слоя в узлах трения, воспринимающих нагрузки аналогичные металлическим антифрикционным материалам. Считается, что благодаря малой величине модуля упругой деформации полимеров, величина контактных напряжений оказывается значительно меньше, чем в металлической паре трения.

С полимерным тонкослойным покрытием, соединенным адгезионными связями с металлом, это задача пока не имеет общепризнанного решения.

При рассмотрении механизма деформирования полимерных материалов следует принимать во внимание, что при общепринятой стандартной форме образцов значительная часть их деформации — это перераспределение объема материала. Применительно к условиям тонкослойного покрытия возможность такой пластической деформации ограничено адгезионным соединением с металлической подложкой, т.е. имеет место характерное трехосное, т.е. объемное сжатие без перемещения полимера в зоне контакта трущихся поверхностей.

Расчетная схема нагружения узла трения с полимерным покрытием, нанесенным на внутреннюю поверхность втулки, изображена на рисунке 1, где  $A$  — радиус внешней поверхности покрытия,  $B$  — радиус адгезионного соединения,  $\delta$  — монтажный зазор,  $R$  — радиус стального вала,  $\beta$  — половина угла контакта,  $u_0$  — максимальное радиальное перемещение полимера,  $r$  и  $\theta$  — полярные координаты,  $O$  — центр втулки,  $O_1$  — центр вала после деформации полимерного слоя,  $P$  — нагрузка на узле трения, приведенная к единице длины.



**Рис. 1.** Расчетная схема для подшипника скольжения с полимерным покрытием: 1 — вал, 2 — полимерный слой, 3 — металлическая подложка

С использованием методики Раевского А.С. [1] для несжимаемых полимерных материалов, когда коэффициент Пуассона  $\mu$  равен 0,5, применительно к рассматриваемой задаче (рисунок 1) в работе, было получено уравнение для определения угла контакта  $2\beta$ :

$$\begin{aligned} \frac{P}{4G\delta} = \frac{6\mu}{1+\mu} \cdot \frac{2A^2B^2}{B^4 - A^4 - 4A^2B^2 \ln \frac{B}{A}} (\sin \beta - \beta \cos \beta) + \\ + \frac{(B^2 - A^2)^2 + \frac{6\mu}{1+\mu} (B^2 + A^2)^2}{B^4 \left( 2 \ln \frac{B}{A} - 1 \right) + A^4 \left( 2 \ln \frac{B}{A} + 1 \right)} (\sin \beta - \beta \cos \beta) \end{aligned} \quad (1)$$

Но это выражение представляет решение задачи, при условии деформации только полимерного слоя, а материал подложки и контртела принимаются абсолютно жесткими. Такая расчетная модель может быть при достаточно большей толщине полимерного слоя, т.е. значительно более 1 мм.

## Методы

Исследование деформативных свойств полимерного слоя.

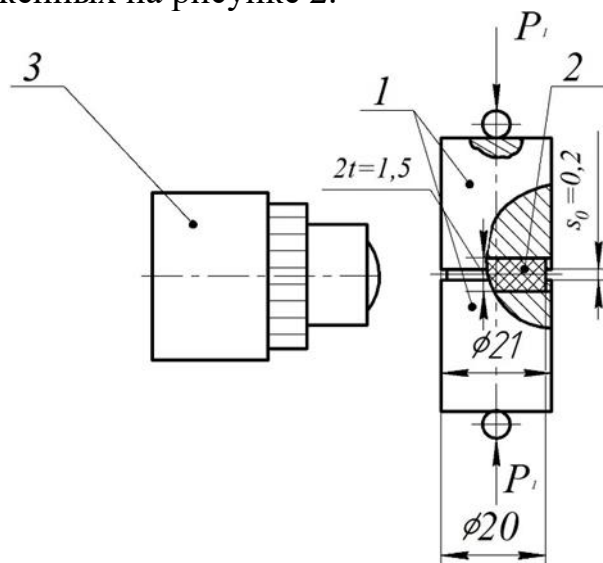
Среди известных марок полиамидных материалов наименьший модуль упругости имеют смолы П-54, П-66/6. По справочным данным его нижний предел может доходить до 400 МПа. Однако деформативные свойства полиамидов существенно зависят от технологии их переработки, поскольку ее режимы предопределяют их надмолекулярные структуры, степень термодеструкции молекул и т.д.

Процесс нанесения покрытий с точки зрения термо-временного воздействия на материал имеет свою выраженную специфику. Как правило, здесь используются более высокие температуры, чем, например, при изготовлении дателей методами литья, но при этом продолжительность теплового воздействия оказывается значительно короче. Большое влияние оказывают также кислород воздуха и структурообразующее воздействие металлической подложки.

Таким образом, проводить измерение и исследование деформативных характеристик полиамидов применительно к тонкослойным покрытиям целесообразно только на образцах, сформированных на металлической основе при идентичных технологических режимах.

В связи с этим в данной работе была использована специальная методика, согласно которой значения коэффициентов Пуассона и

квазистатического модуля упругости устанавливались по результатам испытания на сжатие и сдвиг непосредственно металлополимерных образцов, изображенных на рисунке 2.



**Рис. 2.** Испытание полимерного слоя на сжатие: 1 – стальные цилиндры, 2 – полимерный слой, 3 – измерительный микроскоп

Полиамидное покрытие наносилось на их торцы, которыми они после его оплавления соединялись. Предложенные и примененные способы и установки для нанесения покрытий описаны в работах [5-9]. После остывания и удаления наплывов отвержденного полимера образцы нагружались по схеме, изображенной на рисунке 2.

Наличие адгезионных связей, конфигурация образцов и малая величина зазор  $S_0$  исключали возможность перемещения «запертого» материала в поперечном направлении, поэтому деформация слоя при нагружении образцов происходила за счет изменения объема материала. Устранялось влияние торцевого трения, проявляющееся при испытании на сжатие монолитных образцов. Абсолютная погрешность измерения деформации полимерного слоя с помощью использованного микроскопа составляла  $0,6 \cdot 10^{-3}$  мм.

Решение осесимметричной задачи теории упругости о перемещениях упругого слоя, прочно соединенного с жесткими штампами под действием сжимающих сил  $P_1$ , находилось при помощи бигармонической функции  $\psi = \psi(r, z)$ , удовлетворяющей граничным условиям задачи [10-12].

Искомые величины напряжений и перемещений, выраженные через бигармоническую функцию  $\psi$ , определялись следующими соотношениями:

$$2Gu = \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial z} \quad (2)$$

$$2Gw = 2(1 - \mu) \nabla^2 \psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (2 - \mu) \nabla^2 \psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right] \quad (4)$$

где:  $u$  – радиальные перемещения,  $w$  – осевые перемещения,  $\sigma_z$  – нормальные напряжения сжатия,  $\nabla^2$  – оператор Лапласа,  $G$  – модуль сдвига материала покрытия,  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Условия равновесия полимерного слоя под действием сжимающей нагрузки  $P_1$  имеет вид:

$$P_1 = \int_0^R \int_0^{2\pi} r \sigma_z dr d\Theta \quad (5)$$

Функция перемещений  $\psi$  принята в виде суммы полиномов Лежандра третьей степени [13]:

$$\psi = a(2z^3 - 3r^2z) + b(r^2z + z^3) \quad (6)$$

Частные производные от этой функции в работе были использованы в операторе Лапласа, неизвестные постоянные которого определялись из граничных условий деформирования образцов. При этом было доказано, что нормальные напряжения в замкнутом полимерном слое (рисунок 2) от координаты  $r$  не зависят, т.е. для любой точки справедливо выражение:

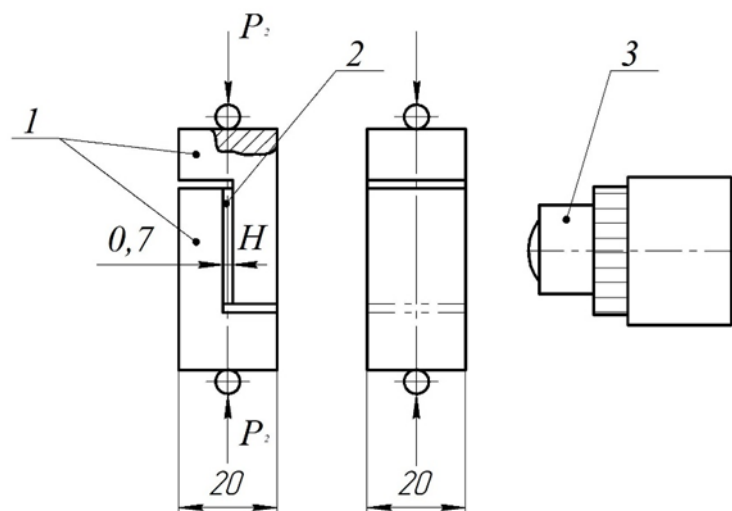
$$\sigma_z = \frac{P_1}{\pi R^2} \quad (7)$$

Для условий нагружения образцов, представленных на рисунке 2 модуль упругости полимера будет равен:

$$E = \frac{P_1}{\pi R^2} \cdot \frac{(1 - 2\mu) \cdot (1 + \mu) h}{(1 - \mu) \cdot S} \quad (8)$$

Таким образом, получено значение модуля упругости, выраженное через продольное сближение образцов  $S$  и коэффициента Пуассона  $\mu$ , величина которого пока не известна. Для ее определения были проведены

испытания призматических металлополимерных образцов при простом сдвиге [14-16] (рисунок 3).



**Рис. 3.** Испытание полимерного слоя на сдвиг: 1 – стальные цилиндры, 2 – полимерный слой, 3 – измерительный микроскоп

В этом случае касательные напряжения, возникающие в полимерном слое под действием сдвигающей нагрузки  $P_2$ , рассчитывались по формуле:

$$\tau = \frac{P_2}{F_{сд}} = G\gamma = \frac{E}{2(1+\mu)} \cdot \frac{l}{H} \quad (9)$$

где  $l$  – смещение одной поверхности полимерного слоя толщиной  $H$  относительно другой,  $F_{сд}$  – площадь полимерного покрытия.

Следовательно:

$$E = \frac{2P_2H(1+\mu)}{lF_{сд}} \quad (10)$$

Полимерные слои в образцах для испытаний при сжатии и сдвиге были получены с помощью одной и той же полимерной композиции при идентичной технологии нанесения. Поэтому здесь справедливо применить равенство правых и левых частей выражений (8) и (10).

Откуда:

$$\frac{P_1F_{сж}lh}{P_2HS\pi R^2}(1-2\mu) = 2(1-\mu) \quad (11)$$

Тогда выражение для коэффициента Пуассона может быть записано в виде:

$$\mu = \frac{a}{2(1+a)}, \quad (12)$$

$$\text{где } a = \frac{P_1 \cdot F_{\text{сд}} \cdot l \cdot h}{P_2 H S \pi R^2}$$

После подстановки значения коэффициента Пуассона в (11) можно определить величину модуля упругости материала покрытия.

В соответствии с разработанной методикой были определены значения модуля упругости и коэффициента Пуассона для покрытий на основе полиамидных смол П-66/6, П-68 и поликапроамида. Эти материалы по своим деформационным свойствам занимают среди полиамидов крайние и промежуточные положения, чем и был определен их отбор для эксперимента.

Полученные значения представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Значения модуля упругости и коэффициента Пуассона полимерных покрытий

| Материал покрытия | Модуль упругости, МПа |                                       | Коэффициент Пуассона |                                       |
|-------------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
|                   | среднее значение      | доверительный интервал, $\alpha=0,95$ | среднее значение     | доверительный интервал, $\alpha=0,95$ |
| Смола П-66/6      | 530                   | 49                                    | 0,490                | 0,003                                 |
| Смола П-68        | 1245                  | 84                                    | 0,492                | 0,004                                 |
| Поликапроамид     | 1425                  | 68                                    | 0,493                | 0,003                                 |

Экспериментальное исследование напряженного состояния полиамидного покрытия.

Особого внимания заслуживает процесс изменения деформации полиамидного и его напряженного состояния при постоянных и длительных нагрузках. Как отмечалось выше, этот процесс существенно зависит от величины гидростатического давления, которое в наиболее нагруженной контактной зоне сопрягаемых деталей достигает у тонкослойного полиамидного покрытия величины, близкой к значениям максимальных контактных давлений. Этот вывод легко подтверждается с помощью выражения (11), представленного выше. Рассматриваемое свойство полиамидных материалов доказывает их перспективность для тяжело нагруженных узлов [17-20].

Проведенные исследования деформативных свойств полиамидных покрытий ставят под сомнение целесообразность включения в расчетную модель цилиндрического сопряжения деформацию самого полимерного слоя. Окончательное заключение по этой предпосылке можно сделать после сравнения ее с деформацией металлической подложки и контртела.

Согласно исследованиям, выполненным в 1973 году Необердиным Ю.А. угол контакта в металлической паре  $2\beta$ , когда радиусы сопрягаемых деталей близки по величине, может быть определен из уравнения (13):



$$\frac{2P}{\epsilon E} \cdot \frac{(1+\chi)(1+\mu)}{4\pi} + \frac{\alpha^2(\alpha+1)}{2\alpha^4 + \ln(\alpha^2+1) - 2} = 0 \quad (13)$$

где  $\alpha = \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}$ ,  $\chi = \frac{3-\mu}{1+\mu}$ .

Известна также эмпирическая зависимость [1]:

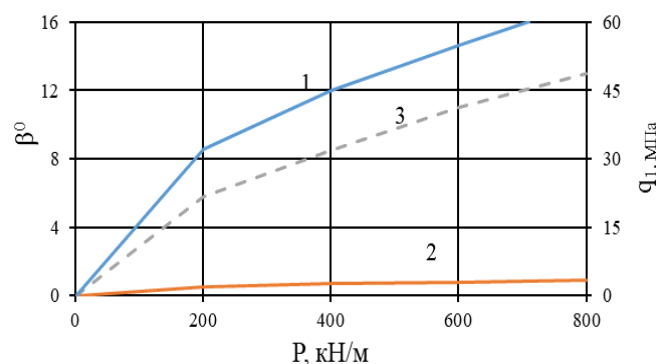
$$\beta = \operatorname{arctg} 2 \sqrt{(\nu_1 + \nu_2) \cdot \frac{2P}{\epsilon D}} \quad (14)$$

где  $\nu_1 = \frac{1-\mu_1^2}{\pi E_1}$ ,  $\nu_2 = \frac{1-\mu_2^2}{\pi E_2}$ .

При одинаковом материале оси и втулки она принимает вид:

$$\beta = \operatorname{arctg} 4 \sqrt{\frac{1-\mu^2}{\pi E} \cdot \frac{P}{\epsilon}} \quad (15)$$

Авторы провели расчеты угла контакта, полученные с помощью выражения (15) рисунок 4 – кривая 1 и 1 – кривая 2 для следующих параметров:  $A=35$  мм,  $P=350$  кН/м,  $\epsilon=0,2$  мм и толщина полимерного слоя – 0,5 мм. Их анализ показывает, что зависимость угла контакта от деформации металлических массивных деталей значительно больше, чем от тонкослойного полиамидного покрытия и с увеличением нагрузки это различие становится более ощутимым. Следует заметить, что расчет выполнен при тех условиях, когда роль полимерного слоя должна проявиться в максимальной степени, т.е. при минимальных значениях модуля упругости и толщинах в 1,5 раза больше оптимальных.



**Рис. 4.** Зависимость угла контакта и максимального контактного давления в шарнире от величины нагрузки: 1, 2 – угол контакта, 3 – контактные давления, 1 – с учетом деформации контртела и подложки, 2 – с учетом деформации только полимерного

покрытия. Диаметр сопряжения – 70 мм, монтажный зазор – 0,2 мм, толщина полимерного покрытия – 0,5 мм

Если принимать в расчет только деформацию подложки и контртела, то расчет максимальных контактных давлений можно проводить с помощью зависимости:

$$q_{\max} = \frac{P}{\pi A} \left\{ N_1 - N_2 \left[ N_3 + \frac{eE}{P} \cdot \frac{\pi}{(1+\chi)(1+\mu)} \right] \right\} \quad (16)$$

$$\text{где } N_1 = \frac{\sqrt{\omega}-1}{\omega} \ln \frac{\sqrt{\omega}-\alpha}{\sqrt{\omega}+\alpha} + \frac{2\alpha}{\sqrt{\omega}},$$

$$N_2 = \frac{1}{2-\ln \omega} \ln \frac{\sqrt{\omega}-\alpha}{\sqrt{\omega}+\alpha},$$

$$N_3 = \frac{\alpha^2 + (\sqrt{\omega}-1)(2-\ln \omega)}{\omega},$$

$$\omega = \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2} + 1, \quad \alpha = \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}.$$

Тогда касательные напряжения, обусловленные действием фрикционных сил, соответственно будут определяться выражением (17):

$$\tau = fq = \frac{Pf}{\pi A} \left\{ N_1 + N_2 \left[ N_3 + \frac{eE}{P} \cdot \frac{\pi}{(1+\chi)(1+\mu)} \right] \right\} \quad (17)$$

На рисунке 4 приведен также график изменения контактных давлений, значения которых были рассчитаны по формуле (16) и определены экспериментально по описанной ниже методике.

Таким образом, очевидно, что деформация полимерного покрытия, если его толщина не превышает 1 мм, во много раз меньше деформации в зоне контакта металлических деталей. Эта закономерность подтверждается для всех известных марок полиамидов с учетом их деформаций, развивающихся во времени при продолжительном действии рабочих нагрузок. Следовательно, для исследуемых конструкций можно пользоваться расчетной моделью, в которой учитывается деформация только металлической подложки покрытия и контртела.

Поскольку этот вывод пока сделан на основе сравнения результатов расчета, выполненного с помощью теоретических моделей, его окончательная достоверность была проверена по данным измерения контактных давлений.

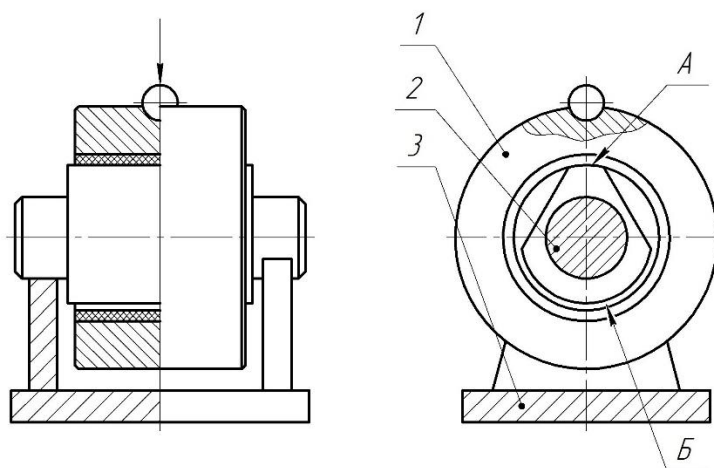
Экспериментальное исследование контактных давлений.

Малая толщина полимерного покрытия создает значительные трудности для экспериментальных исследований их напряженного состояния в зоне контакта с контртелом.

Известно несколько опубликованных работ, в которых представлено несколько способов решения подобной задачи, но почти все они применимы только для толстостенных полимерных втулок, т.к. требуют закрепления в них специальных датчиков.

В связи с этим в данной работе была использована другая методика, основанная на применении емкостных датчиков в виде узких полосок лавсановой пленки толщиной 6 мкм с двухсторонним алюминиевым покрытием, которые закладывались в контакт.

Исследование проводилось на специальном узле, состоящем из втулки 1 с полимерным покрытием (смола П-54), вала 2 с тарировочной площадкой А и рабочей поверхностью Б, подставкой-опорой 3. Размеры деталей: диаметр вала – 70 мм, ширина втулки – 60 мм, толщина ее стенки – 20 мм.



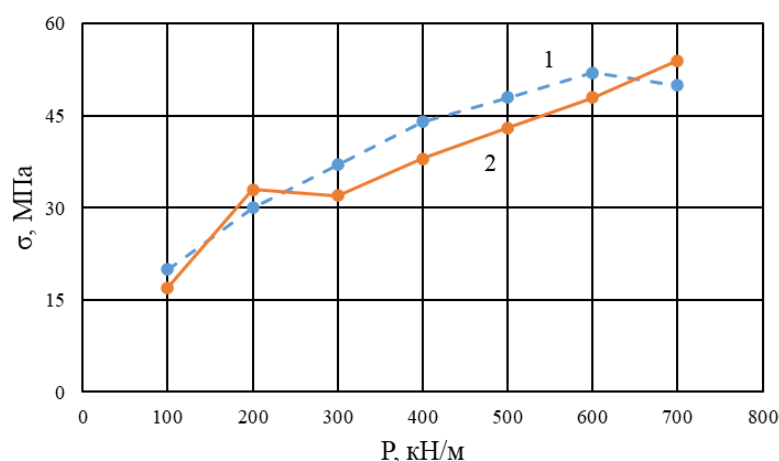
**Рис. 5.** Узел для экспериментального исследования контактных напряжений в металлополимерном шарнире: 1 – втулка с полимерным покрытием, 2 – стальная ось, 3 – подставка-опора

В ходе экспериментальных исследований изучалось влияние геометрических размеров металлополимерных узлов на величину контактных давлений. При постановке эксперимента варьировалась толщина антифрикционного покрытия и диаметрального зазора. Это достигалось применением стальных втулок с различным внутренним диаметром и периодическим растачиванием наносимого на него полимерного слоя.

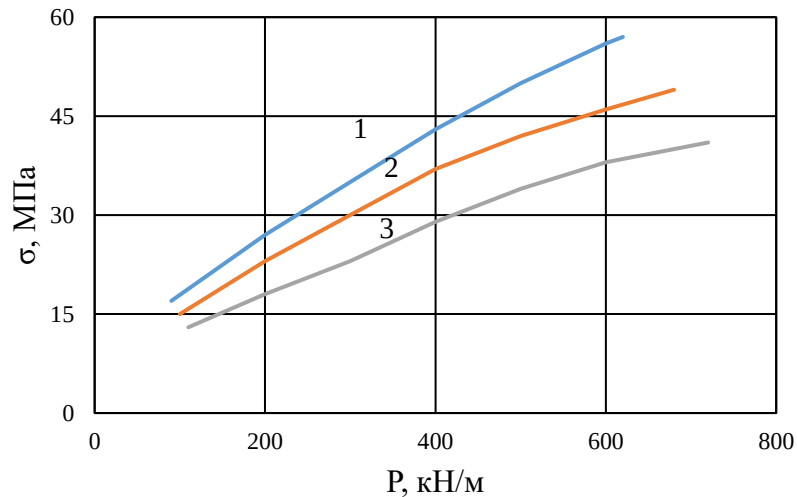
Опыты были повторены также с различными материалами втулок, используемых для нанесения покрытий. Втулки изготавливались из стали (Ст 5), алюминиевого сплава (Ал-9) и бронзы (БРаЖ-9-4). Вал во всех случаях оставался один и тот же (стальной).

## Результаты

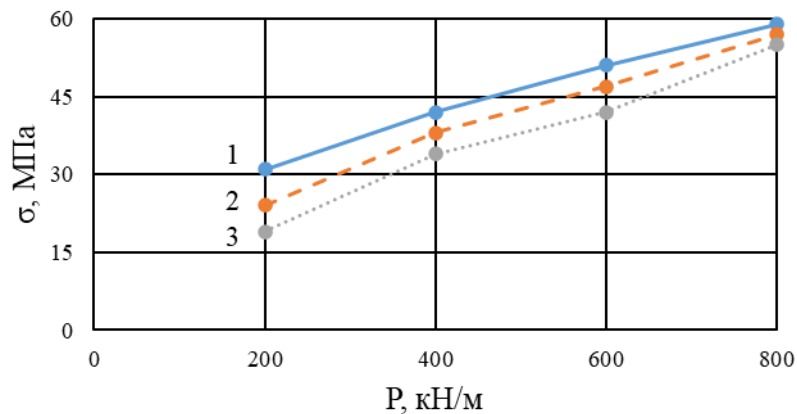
Результаты измерений контактных давлений представлены на рисунках 6-8. Они показывают, что их значение существенно зависело от монтажного зазора. Влияние толщины полимерного слоя в исследованном диапазоне было малозаметным.



**Рис. 6.** Зависимость максимальной величины нормальных контактных напряжений от нагрузки в шарнире с монтажным зазором 0,3 мм: толщина полимерного слоя 1 – 0,3 мм, 2 – 0,5 мм, подложка и вал – стальные



**Рис. 7.** Зависимость величины максимальных контактных напряжений от нагрузки при толщине слоя 0,8 мм: величина монтажного зазора 1 – 1,0 мм, 2 – 0,6 мм, 3 – 0,3 мм



**Рис. 8.** Зависимость величины максимальных контактных напряжений от нагрузки при разном материале подложки: 1 – сталь, 2 – бронза, 3 – алюминий, толщина полимерного слоя – 0,5 мм, монтажный зазор – 0,3 мм

## Закключение

1. Прочная адгезионная связь между металлической подложкой и полиамидным покрытием настолько ограничивает его эластичную деформацию, что при вычислении контактных напряжений ее можно в расчет не принимать. Деформация полиамида происходит в условиях объемного сжатия за счет изменения расстояния между молекулярными структурами. В этих условиях существующее представление о том, что коэффициент Пуассона у полиамида равен 0,5, не работает. Таким образом, характеристики деформационных свойств полиамидов, определенные по

стандартным методикам для расчетов тонкослойных покрытий не приемлемы.

2. Сделанные по результатам экспериментов выводы с нагружением контртел из различных металлов подтвердили достоверность выполненных теоретических исследований.
3. Разработанная экспериментальная методика определения контактных давлений с помощью металлизированных полимерных пленок может найти применение для исследования значительно большего круга инженерных задач, связанных с расчетами контактных напряжений, например, во фланцевых соединениях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Раевский А. Н. Полиамидные подшипники: расчет и проектирование. - М.: Машиностроение, 1967. - 137 с.
- [2] G. Kaush. Polymer Fracture (Berlin: Springer, 1978) – 456 p.
- [3] Firas Awaja, Michael Gilbert, Georgina Kelly, Bronwyn Fox, Paul J. Pigram, Adhesion of polymers, Progress in Polymer Science, Vol. 34, Issue 9, 2009, 948-968 pp.
- [4] Zhang, Y., Hasegawa, K., Sota, K., Takagi, K., Ma, W., Takahara, A. and Takahara, A., Enhanced Adhesion Effect of Epoxy Resin on Metal Surfaces Using Polymer with Catechol and Epoxy Groups, vol. 2, no. 4, pp. 1500–1507.
- [5] Башкарев А. Я., Кущенко А. В., Стукач А. В., Славутин Л. В. Технологии ремонта с применением полиамидов // Вестник машиностроения -2021- № 1 -С. 67-70.
- [6] Яковлев А.Д., Здор В.Ф., Каплан В.И. Порошковые материалы и покрытия на их основе. – Л.: Химия, 1971. – 256 с. (1-е изд.); 1979. – 270 с. (2-е изд.).
- [7] Серкова Е. А., Хмельницкий В. В., Застрогина О. Б. Полимерные материалы для антифрикционных покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. №5 (99). С.56-61
- [8] Негров Д. А., Путинцев В. Ю., Передельская О.А., Наумова А.В. Технология изготовления деталей узлов трения из полимерных композиционных материалов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение, Т. 15, № 2, 2015, с. 13-19.
- [9] Zhang, H., Ge, X., & Ye, H. Effectiveness of the heat conduction reinforcement of particle filled composites. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 13(3), (2005), 401–412 pp. doi:10.1088/0965-0393/13/3/009

- [10] Владимиров В.С., Жаринов В. В. Уравнения математической физики: Учебник для вузов. — 2-е изд., стереотип. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 400 с.
- [11] John W. Eaton, David Bateman, Soren Hauberg, Rik Wehbring. GNU Octave - Edition 4 for Octave version 4.4.1 August 2018 – 1060 p
- [12] Никольский С. М. Квадратурные формулы. — 4-е изд., доп. с добавлением Н. П. Корнейчука. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.- 256 с.
- [13] Хаиров А.Р. О различных формах представления многочленов Лежандра // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки, Т. 33, № 3, 2018, С. 80-93.
- [14] Рудской, А. И. Долговечность полимерных композиционных материалов / А. И. Рудской, А. Я. Башкарев, Л. В. Слаутин // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2021. – № 10. – С. 675-689.
- [15] Башкарев А.Я., Слаутин Л.В., Кущенко А.В., Бессонова В.Ю. Положительное влияние отрицательных напряжений на адгезионную прочность и долговечность полимерных композитов // Современное машиностроение. Наука и образование. 2021. № 10. С. 690-701.
- [16] Милов А. Б. О вычислении контактной жесткости цилиндрических соединений // Проблемы прочности. -1973,- № 1. С. 70-72.
- [17] Rudskoy, A.I., Bashkarev, A.Y., Bessonova, V.Y. (2024). Application of the Thermofluctuation Theory of Strength to Calculate the Durability of Adhesive Joints in the Case of Granite-Bitumen Composites. In: Evgrafov, A.N. (eds) Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. P.225-234 [https://doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1_22)
- [18] Яковлев В.Ф. Измерения деформаций и напряжений деталей машин. - 2-е изд., испр. и перераб. - Москва; Ленинград: Машгиз. [Ленингр. отд-ние], 1963. - 192 с.
- [19] Becker R. Uber die Plfstitizitat amorpher und Kristalliner fester Korper. - Physikalische Zeitschrift, 1925. -1.25,7. S. 919 – 925 pp.
- [20] Kumlutaş, Dilek & Tavman, Ismail. A Numerical and Experimental Study on Thermal Conductivity of Particle Filled Polymer Composites. Journal of Thermoplastic Composite Materials. (2006). Vol.19. 441-455 pp.

## STRESS STATE OF ANTIFRICTION POLYMER COATINGS IN PLAIN BEARINGS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

### Abstract

Due to the prospects of using thin-layer polymer coatings in friction units, the need for additional studies of the physico-mechanical properties of polyamides capable of creating strong adhesive joints with a metal substrate is justified. Theoretically and experimentally, it is proved that when calculating contact stresses in sliding bearings with a polymer layer thickness of less than 1 mm, its deformation can be ignored.

*Key words:* friction units, sliding bearings, polymer coatings, contact stresses

### REFERENCES

- [1] Raevski A. H. Polyamide bearings: calculation and design. - M.: Mechanical engineering, 1967. - 137 p.
- [2] G. Kaush. Polymer Fracture (Berlin: Springer, 1978) – 456 p.
- [3] Firas Awaja, Michael Gilbert, Georgina Kelly, Bronwyn Fox, Paul J. Pigram, Adhesion of polymers, Progress in Polymer Science, Vol. 34, Issue 9, 2009, 948-968 pp.
- [4] Zhang, Y., Hasegawa, K., Sota, K., Takagi, K., Ma, W., Takahara, A. and Takahara, A., Enhanced Adhesion Effect of Epoxy Resin on Metal Surfaces Using Polymer with Catechol and Epoxy Groups, vol. 2, no. 4, pp. 1500–1507.
- [5] Bashkarev A. Ya., Kushchenko A. V., Stukach A. V., Slavutin L. V. Repair technologies with the use of polyamides // Machine Building Vestnik - 2021- No.1 - 67-70 pp.
- [6] Yakovlev A.D., Zdor V.F., Kaplan V.I. Powder materials and coatings on their basis. - L.: Khimiya, 1971. - 256 p. (1st ed.); 1979. - 270 p. (2nd ed.).
- [7] Serkova E. A., Khmelnitsky V. V., Zastrogina O. B. Polymeric materials for antifriction coatings (review) // Proceedings of VIAM. 2021. No.5 (99). 56-61 pp.
- [8] Negrov D. A., Putintsev V. Yu., Peredelskaya O. A., Naumova A. V. Technology of manufacturing parts of friction units from polymer composite materials // Bulletin of South Ural State University. Series: Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 2, 2015, p. 13-19.



- [9] Zhang, H., Ge, X., & Ye, H. Effectiveness of the heat conduction reinforcement of particle filled composites. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 13(3), (2005), 401–412 pp. doi:10.1088/0965-0393/13/3/009
- [10] Vladimirov B.C., Zharinov V.V. *Equations of mathematical physics: Textbook for universities*. - 2nd ed., stereotype. - M.: FIZMATLIT, 2004. - 400 p.
- [11] John W. Eaton, David Bateman, Soren Hauberg, Rik Wehbring. *GNU Octave - Edition 4 for Octave version 4.4.1 August 2018* – 1060 p
- [12] S. Nikolskoye, M. The quadrature formula. — The 4th is decreasing., extras. adding S. N. Very much. Korneychuk. — M.: Nauka. G. land rent.. phys.-math. is., 1988.- p. 256.
- [13] Khairov A.R. On various forms of representation of Legendre polynomials // *Bulletin of Dagestan State University. Series 1: Natural Sciences*, vol. 33, No. 3, 2018, pp. 80-93.
- [14] Rudskoy, A. I. Durability of polymer composite materials / A. I. Rudskoy, A. Ya. Bashkarev, L. V. Slavutin // *Modern mechanical engineering. Science and education*. - 2021. – No. 10. – pp. 675-689.
- [15] Bashkarev A.Ya., Slavutin L.V., Kushchenko A.V., Bessonova V.Yu. The positive effect of negative stresses on the adhesive strength and durability of polymer composites // *Modern mechanical engineering. Science and education*. 2021. No. 10. pp. 690-701.
- [16] Milov A. B. On calculating the contact stiffness of cylindrical joints // *Problems of strength*. -1973, No. 1. pp. 70-72.
- [17] Rudskoy, A.I., Bashkarev, A.Y., Bessonova, V.Y. (2024). Application of the Thermofluctuation Theory of Strength to Calculate the Durability of Adhesive Joints in the Case of Granite-Bitumen Composites. In: Evgrafov, A.N. (eds) *Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. P.225-234 [https://doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1_22)
- [18] Yakovlev V.F. *Measurements of deformations and stresses of machine parts*. - 2nd ed., corrected and revised. - Moscow; Leningrad: Mashgiz. [Leningrad branch], 1963. - 192 p.
- [19] Becker R. *Über die Plfistizitat amorpher und Kristalliner fester Körper*. - *Physikalische Zeitschrift*, 1925. -1.25,7. S. 919 – 925 pp.
- [20] Kumlutaş, Dilek & Tavman, Ismail. A Numerical and Experimental Study on Thermal Conductivity of Particle Filled Polymer Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. (2006). Vol.19. 441-455 pp.