

$$\delta W = \iint_S \left[ \sum_{k=1}^3 \int_{h_k} (2\sigma_{r\varphi}^{(k)} \delta \varepsilon_{r\varphi}^{(k)} + \sigma_{\varphi\varphi}^{(k)} \delta \varepsilon_{\varphi\varphi}^{(k)} + \sigma_{rr}^{(k)} \delta \varepsilon_{rr}^{(k)}) dz + \int_{-c}^c \sigma_{rz}^{(3)} \delta \psi_r dz + \int_{-c}^c \sigma_{\varphi z}^{(3)} \delta \psi_\varphi dz \right] r dr d\varphi. \quad (6)$$

После ряда преобразований получим:

$$\begin{aligned} \delta W = \iint_{r\varphi} [ & r(Q_r \delta \psi_r + Q_\varphi \delta \psi_\varphi + T_{rr} \delta u_{r,r} + H_{rr} \delta \psi_{r,r} - M_{rr} \delta \omega_{,rr} + T_{r\varphi} \delta u_{\varphi,r} + H_{r\varphi} \delta \psi_{\varphi,r} - M_{r\varphi} \delta \omega_{,r\varphi}) + \\ & + T_{r\varphi} (\delta u_{r,\varphi} - \delta u_{\varphi,r}) + H_{\varphi\varphi} (\delta \psi_{\varphi,\varphi} + \delta \psi_r) + H_{\varphi\varphi} (\delta \psi_{\varphi,\varphi} + \delta \psi_r) + H_{r\varphi} (\delta \psi_{r,\varphi} - \delta \psi_\varphi) - \\ & - M_{\varphi\varphi} (\delta \omega_{,r\varphi} + \delta \omega_{,r}) - M_{r\varphi} (\delta \omega_{,r\varphi} - \delta \omega_{,r})] d\varphi dr. \end{aligned} \quad (7)$$

Преобразовав выражение (7), разбив его на два интеграла, а затем приравняв его к работе внешних усилий (5), потребуем выполнение этого равенства при любых значениях варьируемых перемещений. Это возможно при равенстве нулю коэффициентов при независимых вариациях искомых функций.

Отсюда следует система дифференциальных уравнений равновесия в усилиях, описывающая деформирование круглой трехслойной пластинки при неосесимметричном деформировании:

$$\begin{aligned} T_{rr,r} + \frac{1}{r}(T_{rr} + T_{r\varphi,\varphi} - T_{\varphi\varphi}) &= -p_r; & T_{r\varphi,r} + \frac{1}{r}(2T_{r\varphi} + T_{\varphi\varphi,\varphi}) &= -p_\varphi; \\ H_{rr,r} + \frac{1}{r}(H_{rr} - H_{\varphi\varphi} + H_{r\varphi,\varphi}) - Q_r &= 0; & H_{r\varphi,r} + \frac{1}{r}(2H_{r\varphi} + H_{\varphi\varphi,\varphi}) - Q_\varphi &= 0; \\ M_{r\varphi,r} + M_{rr,r} + \frac{1}{r}(2M_{rr,r} + 3M_{r\varphi,r} + M_{\varphi\varphi,r\varphi} - M_{\varphi\varphi,r} + M_{r\varphi,r\varphi}) &= -q. \end{aligned} \quad (8)$$

Если в системе уравнений (8) положить, что нагрузка распределена симметрично (искомые функции не зависят от  $\varphi$ ), то из нее следует система дифференциальных уравнений равновесия в усилиях, описывающая осесимметричное деформирование круговой трехслойной пластинки.

УДК 621.81 - 036.4

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДИФИЦИРОВАНИЯ РТИ

С. В. ПЕТРОВ

Белорусский государственный университет транспорта

Одной из тенденций современного машиностроения является использование разнообразных методов, обеспечивающих надежную работу узлов трения, в том числе и резинометаллических, эксплуатирующихся в сложных условиях трения и изнашивания, действия активных рабочих сред.

Методы поверхностного модифицирования РТИ позволяют получать покрытия, которые значительно снижают поверхностную энергию, повышают стойкость резин к органическим растворителям и обеспечивают при определенных режимах эксплуатации минимальные значения износа и коэффициента трения.

Наиболее широко в настоящее время распространены технологии нанесения покрытий на основе полиуретана (ПУ) и политетрафторэтилена (ПТФЭ) на поверхность резинометаллических изделий с целью снизить потери при трении. Однако отсутствие данных, способных раскрыть механизм трения и изнашивания резин, модифицированных такими покрытиями, препятствует широкому использованию данных технологий. В связи с этим представляет интерес детальное исследование влияния различных способов модифицирования бутадиен-нитрильных резин на их триботехнические свойства.

Для приближения условий испытаний к реальным режимам эксплуатации резинометаллических изделий проводились испытания пар трения резина – металл по схемам вал – частичный вкладыш

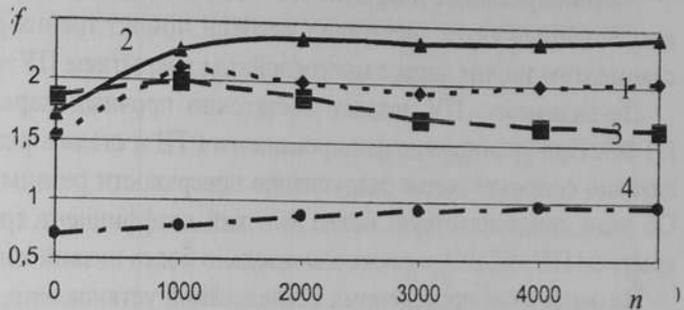
со смазкой с использованием машин трения 2070 СМТ-1 и сфера – плоскость без смазки на микро-трибометре ММТ.

Покрyтия ПТФЭ и ПУ осаждали из активной газовой фазы, генерируемой электронно-лучевым диспергированием исходного полимера в вакууме. Толщина покрытия составляла  $\approx 1$  мкм. Комбинированное покрытие ПУ-ПТФЭ формировали из активной газовой фазы, образованной продуктами диспергирования смеси исходных полимеров в массовом соотношении 1:1.

Результаты испытаний показали, что триботехнические характеристики резинометаллических трибосопряжений, на поверхность которых наносились многослойные полимерные покрытия, превосходят аналогичные показатели исходной пары сталь – резина, а также пары с однослойным полимерным покрытием из политетрафторэтилена и полиуретана.

При испытании по схеме сфера – плоскость были получены следующие результаты (рисунок 1):

Рисунок 1 – Зависимость коэффициента трения  $f$  резины, предварительно обработанной плазмой, от вида покрытия и числа циклов истирания  $n$ : 1 – исходная резина; 2 – покрытие ПУ; 3 – покрытие ПТФЭ; 4 – покрытие ПУ+ПТФЭ в соотношении 1:1



Как видно из рисунка 1, наибольший эффект достигается от модифицирования поверхности резины комбинированным покрытием ПУ+ПТФЭ в соотношении 1:1, которое позволяет более чем в 2 раза снизить коэффициент трения. Тогда как покрытие из ПТФЭ снижает коэффициент трения незначительно, а ПУ даже его повышает.

При испытаниях по схеме ролик – вкладыш получены аналогичные результаты (рисунки 2, 3).

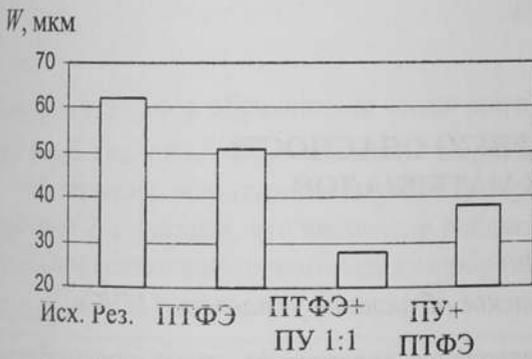


Рисунок 2 – Износ исходных резинометаллических образцов и образцов с модифицированными РТИ

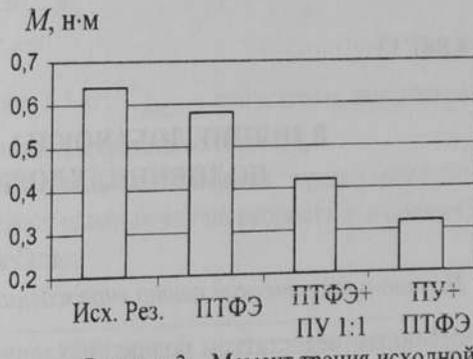


Рисунок 3 – Момент трения исходной резинометаллической пары, а также пар с модифицированными РТИ

Как видно из рисунка 3, наиболее значительно снижается момент трения у резины с покрытиями ПУ+ПТФЭ. Однако данный режим модифицирования не обеспечивает заметного (в несколько раз) снижения износа (см. рисунок 2). Напротив, нанесение на РТИ многослойного покрытия ПУ+ПТФЭ 1:1 не вызывает столь эффективного снижения момента трения, как покрытие ПУ+ПТФЭ, зато существенно (в 2 – 4 раза) снижает износ резинометаллической пары. Исходя из данных фактов, можно предположить следующее объяснение установленных эффектов. При нанесении на поверхность резины многослойного покрытия из ПУ и ПТФЭ, особенно при их одновременном осаждении, данные полимеры, дополняя друг друга, оказывают значительное влияние на процесс изнашивания резинометаллической пары. Так, политетрафторэтилен, благодаря своим триботехническим свойствам (низкий коэффициент трения, возможность изнашиваться слоями), заметно снижает коэффициент трения пары. Однако без полиуретана данное покрытие недолговечно, поскольку оно очень быстро уходит из зоны трения благодаря своей природе, о чем свидетельствует значительная срабатываемость покрытия из ПТФЭ. Полиуретан, напротив, не оказывая сколько-

нибудь заметного влияния на износ и момент трения пары сталь – резина, выполняет функцию упрочнения комбинированного покрытия. Когда наносится покрытие ПТФЭ+ПУ 1:1, молекулы данных полимеров перемешиваются, вместе диффундируют в поверхностные слои РТИ, а также образуют комбинированную пленку, состоящую из этих молекул примерно в пропорции 1:1.

При трении резин пары с покрытием из ПУ+ПТФЭ последний, находясь над слоем ПУ, активно изнашивается, о чем свидетельствует более высокий износ пары трения с данным покрытием, чем износ пары с покрытием ПУ+ПТФЭ 1:1 (см. рисунок 2). Однако за счет триботехнических свойств ПТФЭ значительно снижается момент трения. При этом, как уже было сказано, активно срабатывается слой ПТФЭ, затем достаточно быстро из зоны трения выводится ПУ, и постепенно в процессе трения поверхностная энергия РТИ восстанавливается до поверхностной энергии исходной пары.

Комбинированное покрытие ПУ+ПТФЭ 1:1, напротив, активно сопротивляется изнашиванию, о чем свидетельствует достаточно высокий момент трения резинометаллической пары по сравнению с моментом трения пары с многослойным покрытием ПУ+ПТФЭ (см. рисунок 3).

По-видимому, ПУ создает достаточно прочный каркас, в котором находятся микрочастицы ПТФЭ. При трении модифицированного РТИ о сталь в режиме граничной смазки данное покрытие активно сопротивляется разрушению поверхности резины и самого покрытия, как бы упрочняя ее. Об этом свидетельствует более высокий коэффициент трения по сравнению с многослойным покрытием ПУ+ПТФЭ, а также значительно более низкий износ.

На основании проведенных исследований установлено, что наиболее высокие триботехнические свойства достигаются при нанесении на поверхности резин покрытия из активной газовой фазы, генерируемой электронно-лучевым диспергированием смеси ПТФЭ-ПУ в соотношении 1:1 с активацией продуктов диспергирования плазмой тлеющего разряда. Данные результаты получены при испытаниях по различным схемам.

УДК 614.841.13

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА ПОЖАРНУЮ ОПАСНОСТЬ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*А. С. ПОПКО*

*Научно-практический центр учреждения «Брестское областное управление МЧС»*

Существенным недостатком поливинилхлоридных материалов является их способность образовывать при разложении и горении в условиях пожара большое количество токсичных веществ и дыма. Согласно классификации, предложенной Ильичкиным В. С. и Гусевым В. М., ПВХ материалы по токсичности продуктов горения относятся к классу умеренно опасных материалов. Кроме того, продукты разложения и горения ПВХ не только токсичны, но и коррозионноактивны. При разложении ПВХ выделяется около 20 различных веществ, CO и CO<sub>2</sub>. Указанные обстоятельства вызывают необходимость поиска добавок, способных снизить пожароопасность полимерных материалов на основе поливинилхлоридной смолы.

При изучении влияния ряда веществ на пожароопасные свойства ПВХ материалов в качестве исходного материала были использованы серийные изделия, в состав которых входили поливинилхлоридная смола (ПВХ-смола), диоктилфталат (ДОФ), оксид титана (TiO<sub>2</sub>), силикат свинца (PbSiO<sub>3</sub>), хлорпарафин (ХП), стеариновая кислота (СК) и мел. На основе этого материала было изготовлены композиции, в которые вводили добавки различных веществ: оксид меди (II) (CuO), гидрофосфат аммония [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>], оксид сурьмы (III) (Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), гидроксид алюминия [Al(OH)<sub>3</sub>], борная кислота (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>), мочевины (NH<sub>2</sub>CONH<sub>2</sub>), мочевиноформальдегидная смола (МФС), фенолформальдегидная смола (ФФС), трифенилфосфат (ТФФ). Состав композиций приводится в таблице 1. Все добавки вводились за счет снижения содержания мела. Композит представлял собой пленочный материал толщиной 2 – 3 мм.