

Влияние соляного тумана на истираемость термопластичных полиуретанов

The effect of salt mist on the abrasion of thermoplastic polyurethanes

А.А. КОЛЕШНИКОВ¹, Е.С. БОКОВА¹, А.В. ДЕДОВ²

A.A. KOLESNIKOV¹, E.S. BOKOVA¹, A.V. DEDOV²

¹ Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, г. Москва, Россия

² Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

¹ Russian State University named after A.N. Kosygin, Moscow, Russia

² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

mioxologistalex@gmail.com

В работе предложена математическая модель для прогнозирования истирания полимерных материалов на основе различных марок ТПУ после воздействия соляного тумана, имитирующего условия эксплуатации заправочных топливных рукавов в морской воде и/или на побережье.

Ключевые слова: полиуретаны, истирание, математическая модель, соляной туман, масса, сила трения

The paper proposes a mathematical model for predicting the abrasion of polymer materials based on various brands of TPU after exposure to salt mist, simulating the operating conditions of refueling fuel hoses in seawater and/or on the coast.

Keywords: polyurethanes, abrasion, mathematical model, salt mist, mass, friction force

DOI: 10.35164/0554-2901-2024-01-37-39

Введение

Одним из основных требований к полимерным материалам, используемым в производстве напорно-всасывающих рукавов для перекачки горючего (далее рукав) [1–3], является сопротивление истиранию, которое возникает в результате колебательных движений рукавов по грунту или другим поверхностям [4–7]. Степень истирания полимерной оболочки рукавов, помимо продолжительности эксплуатации, зависит от величины силы трения, твердости поверхности контакта, а также от воздействия факторов окружающей среды.

В связи с вышесказанным практический интерес представляет обоснование параметров для сравнительного анализа устойчивости полимерных материалов к истиранию в различных условиях эксплуатации и возможность их математической обработки для получения прогнозных моделей.

Для производства рукавов традиционно используют резину и резинотканевые материалы на основе нитрильных каучуков с текстильным каркасом [8–10], которые в настоящее время все чаще заменяют материалами на основе термопластичных полиуретанов (ТПУ) [11–13], армированных тканями из полиэфирных нитей (рис. 1).

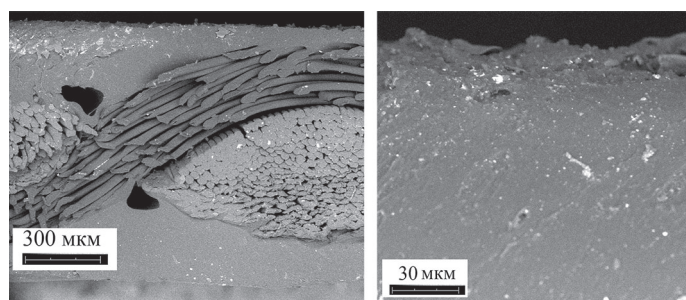


Рис. 1. Микрофотографии поперечного среза оболочки рукава на основе ТПУ 3290, армированного тканью из полиэфирных нитей (а), и поверхностного слоя рукава, контактирующего с грунтом (б).

Несмотря на сложную морфологию и композиционный состав такого рода материалов, основную нагрузку при истирании берет на себя тонкий поверхностный слой (оболочка) из термопластичного полимера.

В работах [14–18] авторами настоящей статьи предложен подход к разработке модели прогнозирования кинетики истирания рука-

вов и обоснованы параметры для сравнения их эффективности в зависимости от применяемого полимера. В основе предложенного подхода лежит определение изменения массы образцов при постоянной силе трения и соотношении между скоростью истирания и силой трения.

Модель использовали для прогнозирования истирания материалов на основе различных марок ТПУ [14, 17, 18] и резины на основе нитрильного каучука [15, 16] при их контакте с поверхностями различной твердости [18], а также после воздействия УФ-излучения [17].

Целью настоящей работы является применение предложенного подхода для разработки модели прогнозирования истирания полимерных материалов на основе различных марок ТПУ после воздействия соляного тумана, имитирующего условия эксплуатации рукавов в морской воде и/или на побережье.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали ТПУ 3290, ТПУ 2105 и ТПУ 2037 (Израиль). Из листа полимерного материала вырезали образцы в форме диска диаметром 120 мм известной массы. Испытания проводили на устройстве Табера МТ 192 [19–21]. Скорость вращения абразива составляла 60 ± 2 об/мин, общая нагрузка, включающая массу сменных абразивов и массу устройства для их крепления, равнялась 0,25; 0,50; 0,75 и 1,00 кг, что соответствовало силе трения 2,5; 5,0; 7,5 и 10,0 Н. Использовали абразив марки Н-18 с твердостью по Шору D, равной 81. Ширина абразива и, соответственно, ширина полосы истирания поверхности образцов составляла 10 мм.

Изменение массы образцов в процессе истирания фиксировали через каждые 1000 оборотов абразива с точностью $\pm 0,002$ г. Испытания проводили до 3000 оборотов или в течение 50 мин непрерывного действия на образец. При проведении испытаний продолжительность действия силы трения как отношение количества оборотов абразива к скорости вращения составляла 60 ± 2 об/мин.

Воздействие соляного тумана на образцы ТПУ осуществляли в соответствии с требованиями ГОСТ 30630.2.5-2013 «Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие соляного тумана». Концентрация соляного раствора по массе составляла $5 \pm 1\%$, pH от 6,5 до 7,2 при температуре $35 \pm 2^\circ\text{C}$, температура выдержки $35 \pm 2^\circ\text{C}$, время выдержки 168 часов.

Экспериментальная часть

Подход к разработке модели для прогнозирования кинетики истирания полимерных материалов на основе ТПУ основан на установлении зависимости уменьшения массы образца ($m - m_1 = \Delta m$, кг, где m и m_1 соответственно масса образца до и после истирания, кг) от количества оборотов абразива (N , оборотов) при постоянной силе трения. В случае линейного вида зависимости $\Delta m \times 10^3$ от N определяется скоростью истирания, которая является коэффициентом размерности в уравнении общего вида [12]:

$$\Delta m \times 10^3 = K_m \times N \quad \text{при } Q = \text{const}, \quad (1)$$

где K_m – скорость уменьшения массы образца, кг/(оборот $\times$ 10 мм), N – количество оборотов абразива при заданной силе трения; Q – сила трения, Н.

Степенное выражение критерия как $\Delta m \times 10^3$ использовали для удобства построения графических зависимостей, что привело к необходимости в данной степени изменения массы образцов.

Уравнение (1) предназначено для прогнозирования уменьшения массы образцов в зависимости от продолжительности действия постоянной силы трения. Для моделирования истирания при переменной силе трения применяли зависимость скорости износа от силы трения (Q , Н).

В случае экспоненциального вида зависимостей K_m от Q соотношение между скоростью износа и переменной силой трения описывается уравнением общего вида [14–18]:

$$K_m = K_N \times e^{K \cdot Q}, \quad (2)$$

где K_N и K – коэффициенты размерности, кг/(оборот $\times$ 10 мм) и Н⁻¹ соответственно.

Подставляя уравнение (2) в уравнение (1) получили модель для прогнозирования истирания по критерию уменьшения массы ТПУ от двух переменных процесса – заданного количества оборотов абразива, которое при скорости испытаний 60 ± 2 об/мин отражает продолжительность непрерывного действия силы трения, и переменной величины силы трения [14–18]:

$$\Delta m \times 10^8 = K_N \times N \times e^{K \cdot Q} \quad (3)$$

В работе предложено использование коэффициентов K_N и K в качестве параметров для сравнения истирания ТПУ различных марок, а также влияния на износ условий эксплуатации ТПУ. Согласно выражению (3), коэффициент K_N соответствует скорости износа при условии $Q \rightarrow 0$. Условие $Q \rightarrow 0$ выполняется при хранении, транспортировании и разворачивании незаполненных рукавов, для которых сила трения определяется массой пустого рукава и стремится к минимальной величине [14–18].

Коэффициент K отражает зависимость истирания от силы трения при эксплуатации рукавов. Из выражения (3) следует, что при $K \times Q < 1$ сила трения в незначительной степени влияет на износ, который в таких условиях эксплуатации определяется продолжительностью действия силы трения. Зависимость износа от силы трения появляется при условии $K \times Q > 1$. Из $K \times Q = 1$ рассчитывается критическая сила трения ($Q_{кр}$, Н), выше значения которой истирание начинает зависеть от силы трения. Критическую силу трения определяли из уравнения [14–18]:

$$Q_{кр} = \frac{1}{K} \quad (4)$$

Модель (3) используется для прогнозирования уменьшения толщины оболочки рукавов (Δd , м), что можно определить по известной величине Δm , площади истирания (S , м²) и плотности образцов ТПУ (ρ , кг/м³) из уравнения:

$$\Delta d = \frac{\Delta m}{\rho S} \quad (5)$$

В условиях испытаний при использовании устройства Табера площадь полосы износа образцов составляет $28,26 \times 10^{-2}$ м с учетом плотности ТПУ, равной 920 кг/м³, уравнение (5) принимает вид:

$$\Delta d = 3,8 \times 10^{-3} \Delta m \quad (6)$$

Для проверки возможности использования предложенного подхода к моделированию истирания использованных в работе образцов ТПУ 3290, ТПУ 2105 и ТПУ 2037 после воздействия соляного тумана получены зависимости $\Delta m \times 10^3$ от N (рис. 2).

Зависимости имеют линейный вид (рис. 2) и со степенью корреляции не менее 0,91 подчиняются уравнению (1) с возможностью

расчета скорости износа, что является первым условием предложенного подхода к разработке модели прогнозирования кинетики истирания.

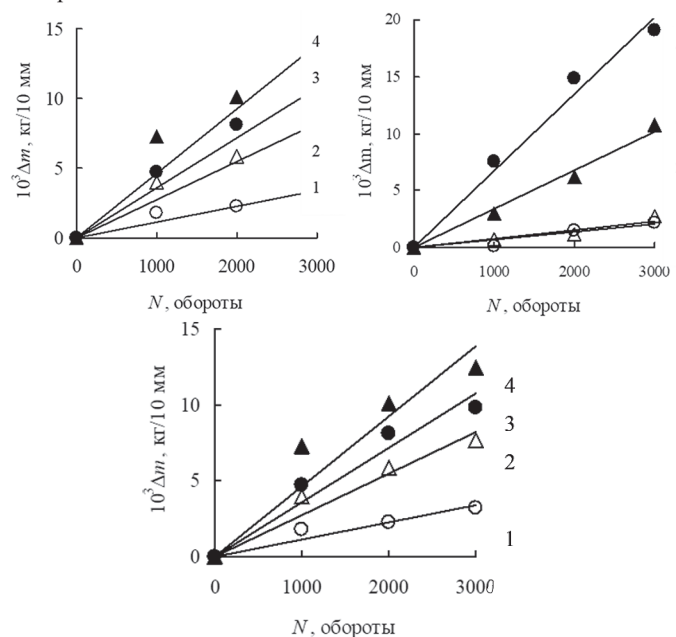


Рис. 2. Зависимость уменьшения массы образцов ТПУ 3290 (а), ТПУ 2037 (б) и ТПУ 2105 (в) от количества оборотов абразива при силе трения 5,0 (1), 7,5 (2), 10,0 (3) и 12,5 (4) Н после действия соляного тумана.

Вторым условием является экспоненциальный вид зависимостей K_m от Q (рис. 3), которые со степенью корреляции не менее 0,84 описываются уравнением (2).

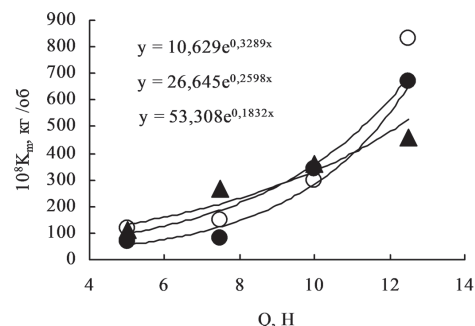


Рис. 3. Зависимость скорости истирания от силы трения для образцов ТПУ 3290 (○), ТПУ 2037 (▲) и ТПУ 2105 (●).

Значения коэффициентов K_N и K в уравнении 3 и $Q_{кр}$ для ТПУ различных марок до и после воздействия соляного тумана представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов модели.

Марка ТПУ	Значения K_N , кг/(оборот $\times$ 10 мм)		Значения K , Н ⁻¹		Значения $Q_{кр}$, Н	
	1	2	1	2	1	2
ТПУ3290	0,14	10,6	0,17	0,33	5,3	3,3
ТПУ2037	0,18	26,6	0,22	0,26	4,1	4,0
ТПУ2105	0,04	53,3	0,31	0,18	3,3	5,1

1 – исходного материала [15–17];

2 – после воздействия соляного тумана.

Видно, что по сравнению с исходными образцами ТПУ действие соляного тумана вызывает значительное повышение коэффициентов K_N и K , что свидетельствует об увеличении истирания всех образцов после воздействия соляного тумана. В большей степени увеличивается коэффициент K_N , отражающий уменьшение массы образцов при действии минимальной силы трения (табл. 1). В то же время $Q_{кр}$ для образцов ТПУ исследуемых марок до и после воздействия соляного тумана практически совпадают.

Комбинации различных значений коэффициентов K_N и K ограничивают сравнение истирания образцов ТПУ разных марок в условиях испытаний. Для устранения этого недостатка применяли численное решение уравнений (3) и (6) (путем подстановки уравнения (3) в уравнение (6)).

Использование в качестве критерия оценки истирания изменения толщины оболочки рукавов имеет большее практическое значение по сравнению с использованием в качестве критерия износа снижения массы, рассчитанного из уравнения (3). Численное решение уравнений (3) и (6) получали при заданных показателях изменения силы трения от 0 до 15 Н и числа оборотов вращения абразива – от 0 до 80000 оборотов, что соответствует 55 суткам непрерывной продолжительности действия силы трения определенной величины.

Графические решения зависимости уменьшения толщины ТПУ различных марок после воздействия соляного тумана от продолжительности действия и величины силы трения представлены на рис. 4. Для наглядности зависимостей численное решение уравнения (6) при подстановке в уравнение (3) выполнено, исходя из максимального уменьшения толщины образцов до 20 мм, что соизмеримо с толщиной рукава.

Уменьшение толщины ТПУ различных марок после воздействия соляного тумана зависит от комбинации продолжительности действия и величины силы трения. Видно, что при определенном сочетании данных показателей, которые на рис. 4 обозначены линиями пересечения зависимостей 2–3 и 1–2, минимальное уменьшение толщины при истирании наблюдается для материала на основе ТПУ 2105, максимальные снижения толщины – для материала на основе ТПУ 3290 (рис. 4).

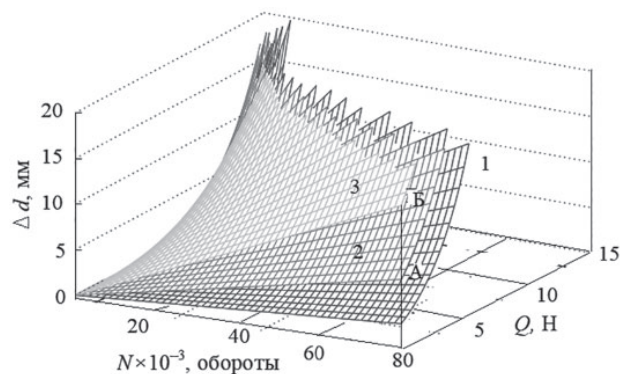


Рис. 4. Зависимость уменьшения толщины рукавов на основе ТПУ 3290 (1), ТПУ 2037 (2) и ТПУ 2105 (3) от продолжительности действия и величины силы трения (0–А соответствует линии пересечения зависимостей 1 и 2; 0–Б соответствует линии пересечения зависимостей 2 и 3, пояснения в тексте).

Можно предположить, что следствием действия соляного тумана является гидролиз полиуретана при конденсации на поверхности образцов раствора хлорида натрия. Толщина слоя ТПУ, в котором происходит деструкция полимера со снижением молекулярной массы, определяется скоростью диффузии раствора хлорида натрия в полимере. Чем ниже проницаемость по раствору хлорида натрия за время испытаний, тем меньше изменения состояния полимера в верхних слоях образца при сохранении его свойств в объеме. По-видимому, этим можно объяснить вид зависимостей $\Delta m \times 10^3$ от N для ТПУ 2105 (рис. 1в), где в начальный момент действия абразива наблюдается значительное уменьшение массы образца вследствие удаления поверхностного слоя, с последующим ее снижением за равные промежутки времени действия абразива.

Выводы

- обоснованы критерии для адекватной оценки кинетики уменьшения толщины полимерных материалов на основе термопластичных полиуретанов в процессе истирания;
- предложенный ранее подход к моделированию кинетики истирания полимерных материалов на основе термопластичных полиуретанов может быть применим для прогнозирования уменьшения толщины этих полимеров после воздействия соляного тумана;
- увеличенная скорость истирания полимерных материалов на основе термопластичных полиуретанов является следствием диффузии раствора хлорида натрия, и уменьшение толщины полимеров в процессе истирания определяется скоростью диффузии хлорида натрия в полимере.

Литература

- Kerber S (2013) Analysis of one and two-story single family home fire dynamics and the impact of firefighter horizontal ventilation//Fire Technol. 2013. V.49. №4. P. 857–889.
- Kerber S., Regan J.W., Horn G.P., Fent K.W., Smith D.L. Effect of Firefighting Intervention on Occupant Tenability during a Residential Fire//Fire Technol. 2019. V.55. №1. P. 2289–2316.
- Chung Y.-C., Park J. E., Choi J. W., Chun B. C. Enhancement of Tensile Strength and Shape Recovery Characteristics of Grafted Polyurethane Using Melamine as a Crosslinking Agent//Macromol. Res. 2021. V.29. №11. P. 776–784.
- Portnov S. V., Podkolzina L. V., Yakovlev S. N. Main types of wear of modern structural polyurethanes//Sb. Mashinost. Priborost. 2016. №12. P. 40–44.
- Abdulkadir L. N., Abou-El-Hossein K., Jumare A.I., Odedeyi P.B., Liman M.M., Olaniyan T.A. Ultra-precision diamond turning of optical silicon—a review//Inter. J. Advanced Manufacturing Technol. 2018. V.96. №4. P.173–208.
- Mashkov Yu. K., Kurguzova O. A., Ruban A. S. Development and research of wear-resistant polymer nanocomposites//Vestn. Sib. Gos. Avtomob.-Dorozhn. Akad. 2018. V.15. №1. P. 36–45.
- Senichev V.Yu., Pogoreltsev E.V., Makarova M.A., Slobodinyuk A.I. The Influence of Fillers on Abrasive Wear of Segmented Polyurethane Urea//Polym. Sci. Series D. 2021. V.14. №3. P. 467–469.
- Jincheng W., Yuehui C., Zhaoqun D. Research on the adhesive property of polyethylene terephthalate (PET) cord and nitrile-butadiene rubber (NBR) system. J. Ind. Text. 2005. V.35. №2. P. 157–172.
- Jamshidi M. Study on cord/rubber interface at elevated temperatures by H-pull test method//Appl. Surf. Sci. 2005. V.249. №1–4. P. 208–215.
- Milyushkina E.G., Lyusova L.R., Monakhova T.V., Faleev A.G., Petrogradskii A.V. Chelates of Metals as Adhesion Promoters in Adhesive Compositions Based on Butadiene–Nitrile Rubber//Polym. Sci. Series D. 2018. V.11. №3. P. 284–287.
- Liu Y., Tan H Effect of accelerated xenon lamp aging on the mechanical properties and structure of thermoplastic polyurethane for stratospheric airship envelope//J.Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 2014, V.29. №6. P. 1270–1276.
- Uddin Md. S., Ju J. Understanding the shape memory behavior of thermoplastic polyurethane elastomers with coarse-grained molecular dynamics simulations//MRS Advances. 2017. V.2. № 6. P. 1–6.
- Radzi S A. M., Sapuan M., Jawaid M., Mansor M. R. Influence of fibre contents on mechanical and thermal properties of roselle fibre reinforced polyurethane composites//Fibers and Polymers 2017. V.18. №7. P. 1353–1358.
- Kolesnikov A.A., Dedov A.V., Sharova L.I. Abradability of thermoplastic polyurethane for flexible fuel storage tanks//Polym. Sci. Series D. 2019. V.12. №3. P. 341–343.
- Колесников А.А., Дедов А.В., Назаров В.Г., Доронин Ф.А., Кондратов А.П. Моделирование кинетики износа резиновых валов полиграфического оборудования//Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2020. №1. С. 19–22.
- Колесников А.А., Дедов А.В., Назаров В.Г. Абразивный износ прорезиненных валов полиграфического оборудования после контакта с органическим растворителем// Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2020. №2. С. 41–44.
- Колесников А.А., Дедов А.В., Рыбаков Ю.Н., Кюннап Р.И. Влияние солнечного излучения на абразивный износ полимерных резервуаров склада временного хранения топлива//Материаловедение. 2020. №8. С. 14–18.
- Колесников А.А., Дедов А.В., Рыбаков Ю.Н., Кюннап Р.И. Истираемость термопластичного полиуретана после контакта с бензином //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. №5 С. 30–34.
- Debaets P., VanParys F., Kalacska G. The friction and wear of different polymers under high load conditions//Synthetic lubrication. 2002. V.18. №1. P. 109–118.
- Myshkin N.K., Petrokovets M.I., Kovalev A.V. Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer//Tribology International 2005–2006. V.38. №11–12. P. 910–920.
- Myshkin N.K., Grigoriev A.Ya. Equipments and materials for tribotesting in open space on International Space Lab//Tribology in Industry 2011 V.33. №1. P. 43–46.