

**Абразивный износ материалов на основе пластифицированного поливинилхлорида****Abrasive wear of materials based on plasticized polyvinyl chloride**А.А. КОЛЕСНИКОВ<sup>1</sup>, Е.С. БОКОВА<sup>1</sup>, А.В. ДЕДОВ<sup>2</sup>, В.Г. НАЗАРОВ<sup>2</sup>A.A. KOLESNIKOV<sup>1</sup>, E.S. BOKOVA<sup>1</sup>, A.V. DEDOV<sup>2</sup>, V.G. NAZAROV<sup>2</sup><sup>1</sup>Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, Россия<sup>2</sup>Московский политехнический университет, Москва, Россия<sup>1</sup>Kosygin Russian State University, Moscow, Russia<sup>2</sup>Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

mixologistalex@gmail.com

Цель исследования – применение ранее разработанной модели прогнозирования абразивного износа изделий из термопластичных полиуретанов к материалам на основе пластифицированного поливинилхлорида. Подтверждение правомерности применения предложенного подхода для оценки влияния различных факторов износа на снижение массы пластифицированного поливинилхлорида (ПВХ). Сравнительный анализ износа материалов на основе термопластичного полиуретана и пластифицированного ПВХ.

Ключевые слова: пластифицированный поливинилхлорид, абразивный износ, моделирование

The purpose of the study is to apply a previously developed model for predicting abrasive wear of products made of thermoplastic polyurethanes to materials based on plasticized polyvinyl chloride. Confirmation of the validity of the proposed approach to assess the impact of various wear factors on weight reduction of plasticized polyvinyl chloride (PVC). Comparative analysis of wear of materials based on thermoplastic polyurethane and plasticized PVC.

Keywords: plasticized polyvinyl chloride, abrasive wear, modeling

DOI: 10.35164/0554-2901-2023-1-2-44-46

*Введение*

Одной из областей практического применения пластифицированного поливинилхлорида (ПВХ) является производство напорно-всасывающих рукавов для перекачки воды [1–3] и химически агрессивных жидкостей [4, 5].

Общим требованием к таким изделиям является их сопротивление абразивному износу, возникающему при динамическом контакте с поверхностями различной природы (песок, асфальт, бетон и т.д.). Следствием абразивного износа, в зависимости от времени воздействия на изделие и величины силы трения, является уменьшение его толщины, и, как следствие, массы, что приводит к нарушению надежности эксплуатации, вплоть до полной потери функциональных свойств.

В работах [6–8] предложен подход для прогнозирования кинетики уменьшения толщины и массы пленок на основе термопластичных полиуретанов (ТПУ) и резинотканевых материалов, которые используются в производстве напорно-всасывающих рукавов и эластичных резервуаров временного хранения нефти и нефтепродуктов [9–13].

Цель работы – использование математического подхода, ранее применяемого и адекватно описывающего процесс поведения материалов на основе ТПУ и резины при абразивном износе, для материалов на основе пластифицированного ПВХ.

*Объекты и методы исследования*

В качестве объектов исследования использовали пленки на основе суспензионного ПВХ-С-70У СТО 00203312-006-2012 (АО «Башкирская содовая компания») с содержанием диоктилфталата 60 мас.ч. на 100 мас.ч. полимера, полученные каландровым методом производства.

Испытания проводили на устройстве Табера [14] при скорости вращения абразива 60±2 оборотов/мин и общей массе, включающей массу сменных абразивов и массу устройства для крепления абразива, 0,50; 0,75; 1,00 и 1,25 кг, что соответствовало силе трения 5,0; 7,5; 10,0 и 12,5 Н. Расстояние от точки нагружения образца до рычага составляло 0,1 м при ширине абразива (ширина полосы истирания поверхности образцов) 10 мм. Изменение массы образ-

цов после каждых 1000 оборотов абразива HR-18 твердостью по Шору D 81 устанавливали с точностью ±0,002 г.

*Результаты и их обсуждение*

Предложенный подход к моделированию абразивного износа ТПУ и резинотканевых материалов [6–8] заключается в установлении кинетических зависимостей уменьшения массы ( $\Delta m$ , кг) образцов при действии постоянной силы трения ( $Q$ , Н). Продолжительность абразивного износа определяется количеством оборотов абразива ( $N$ , оборот).

Первым условием выполнения предложенного подхода моделирования абразивного износа ТПУ и резинотканевых материалов является получение линейных зависимостей  $\Delta m$  от  $N$ , которые описываются уравнениями общего вида:

$$\Delta m = K_m N \quad \text{при } Q = \text{const} \quad (1)$$

где  $K_m$  – скорость абразивного износа, кг/(оборот×10 мм), или уменьшение массы образца за один оборот вращения абразива на полосу истирания шириной 10 мм.

Вторым условием применения разработанного подхода моделирования абразивного износа является экспоненциальный вид зависимостей  $K_m$  от  $Q$ , которые описываются уравнениями общего вида:

$$K_m = K_N \times e^{KQ} \quad (2)$$

где  $K_N$  и  $K$  – коэффициенты размерности, кг/(оборот×10 мм) и Н<sup>-1</sup>.

Подставляя уравнение (2) в уравнение (1), получили модель прогнозирования абразивного износа от двух переменных процесса, таких как  $N$  и  $Q$ :

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

Коэффициенты  $K_N$  и  $K$  использовали в качестве параметров оценки зависимости абразивного износа ТПУ и резинотканевого материала от условий процесса износа, на который в первом приближении может влиять химическая природа материала и морфология поверхности, в частности, наличие инородных частиц или продуктов износа [15, 16].

Из уравнения (3) следует, что если  $Q \rightarrow 0$ , то  $e^{KQ} \rightarrow 1$  и  $\Delta m = K_N \times N$ . При выполнении условия  $Q \rightarrow 0$  абразивный износ зависит от

продолжительности действия силы трения. Величина силы трения, выше которой абразивный износ ТПУ и резинотканевого материала начинает зависеть не только от продолжительности действия на материал, но и от ее величины, определяется граничным значением  $e^{K \times Q}$ . При условии  $K \times Q > 1$ ,  $\Delta m$  начинает зависеть не только от  $N$ , но и от  $Q$ . Из  $K \times Q = 1$  рассчитывали величину критической силы трения ( $Q_{кр}$ , Н), выше которой начинает происходить абразивный износ материала:

$$Q_{кр} = 1/K \tag{4}$$

В разработанной модели (3) в явном виде отсутствует продолжительность действия силы трения. Исходя из того, что при испытаниях скорость вращения абразива может варьироваться в широких пределах, в модели используется не продолжительность истирания, а количество оборотов абразива, которое при заданной скорости вращения позволяет рассчитать продолжительность истирания ( $\tau$ , мин) по формуле

$$\tau = N/w, \tag{5}$$

где  $w$  – скорость вращения абразива, обороты/мин.

Модель (3) может использоваться не только для прогнозирования уменьшения массы образцов, но и толщины, что можно сделать по установленной экспериментально величине  $\Delta m$ , площади истирания ( $S$ , м<sup>2</sup>) и плотности образцов ( $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>). Для расчета уменьшения толщины ( $\Delta d$ , м) полимерных материалов предложено следующее уравнение:

$$\Delta d = \Delta m / \rho S \tag{6}$$

Ниже представлены экспериментальные результаты применения разработанного подхода для прогнозирования абразивного износа пленок на основе пластифицированного ПВХ.

На рис. 1. приведены зависимости уменьшения массы образцов ( $\Delta m$ ) от числа оборотов абразива ( $N$ ).

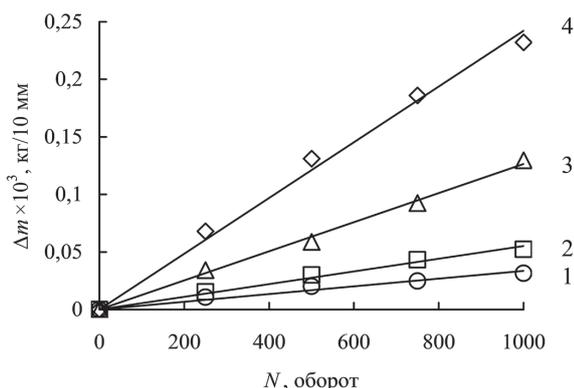


Рис. 1. Уменьшение массы образцов ПВХ от числа оборотов абразива при действии силы трения 5,0 (1); 7,5 (2); 10,0 (3) и 12,5 (4) Н.

Для всех исследуемых образцов зависимости  $\Delta m$  от  $N$ , полученные при варьировании силы трения, имеют линейный вид и с коэффициентом корреляции, равным 0,98, описываются уравнениями типа уравнения (1), что является первым условием применения разработанного подхода прогнозирования абразивного износа полимерных материалов.

Зависимость  $K_m$  от  $Q$  представлена на рис. 2.

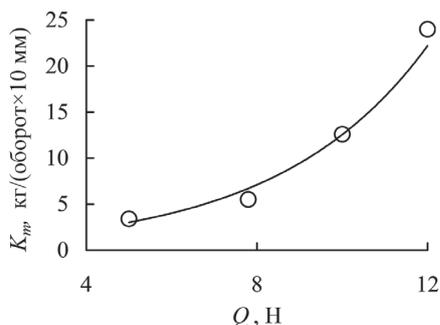


Рис. 2. Зависимость скорости абразивного износа образцов пластифицированного ПВХ от силы трения.

Зависимость  $K_m$  от  $Q$  имеет экспоненциальный вид и с коэффициентом корреляции, равным 0,92, описывается уравнением, аналогичным уравнению (2).

Таким образом, полученные результаты показывают возможность применения математического подхода, разработанного для прогнозирования абразивного износа ТПУ и резинотканевого материала, для пленок на основе пластифицированного ПВХ.

Модель, описывающая уменьшение массы пластифицированного ПВХ от двух переменных процесса – продолжительности действия и величины силы трения – имеет вид уравнения (3).

В табл. 1 представлены значения коэффициентов  $K_N$  и  $K$  для пленок на основе ПВХ, а также полученные ранее значения этих коэффициентов для материалов на основе ТПУ 2105 СР и резинотканевого материала [6–8].

Из данных табл. 1 следует, что значение критической силы трения ( $Q_{кр}$ , Н) материалов на основе ПВХ соответствует критической силе трения для ТПУ 2105 СР и практически в два раза больше, чем для резинотканевого материала. При этом коэффициент  $K$  у обоих материалов одинаков, что свидетельствует о приблизительно равном их абразивном износе.

В то же время значение коэффициента  $K_N$  образцов пластифицированного ПВХ превышает данный показатель для ТПУ 2105 СР, но имеет значение меньше, чем у резинотканевого материала. Полученный результат свидетельствует о том, что при одинаковой продолжительности действия силы трения, которая меньше критической величины, абразивный износ пленок на основе пластифицированного ПВХ больше абразивного износа материалов на основе ТПУ, но меньше, чем у резинотканевого материала.

Таблица 1. Показатели коэффициентов  $K_N$  и  $K$  уравнений для прогнозирования абразивного износа различных полимерных материалов.

Полимерные материалы на основе:	$K_N$ , кг×(оборот) <sup>-1</sup>	$K$ , Н <sup>-1</sup>	$Q_{кр}$ , Н
ПВХ	0,72	0,30	3,3
ТПУ 2105 СР	0,04	0,31	3,3
Резинотканевый материал	3,80	0,21	0,46

Для определения влияния коэффициента  $K_N$  на абразивный износ материалов на основе ПВХ и ТПУ 2105 СР, имеющих равные коэффициенты  $K$ , выполнено численное решение уравнения (3).

Для решения уравнения задали, что сила трения изменяется от 0 до 15 Н, количество оборотов абразива от 0 до 8000, что при скорости вращения 60 оборотов/мин соответствует непрерывной продолжительности действия силы трения в течение суток.

Графическое решение уравнения (3) для материалов на основе ПВХ и ТПУ 2105 СР представлено на рис. 3.

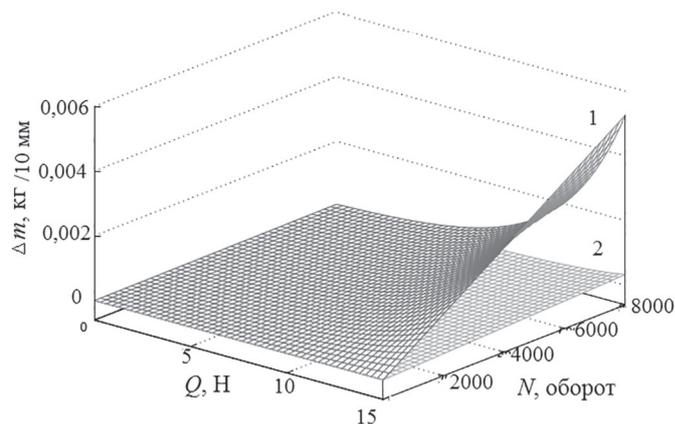


Рис. 3. Уменьшение массы материалов на основе пластифицированного ПВХ (1) и ТПУ 2105 СР (2) при абразивном износе в зависимости от продолжительности процесса и величины силы трения.

Из рис. 3 очевидно, что при силе трения меньше 10 Н, независимо от продолжительности действия абразива, поведение материалов на основе ПВХ и термопластичного полиуретана практически одинаково.

При силе трения больше 10 Н и количестве оборотов абразива более 4000 масса образца ПВХ резко уменьшается, в то время как масса образца ТПУ 2105 СР практически не изменяется (рис. 3).

Значительное снижение массы образца ПВХ при силе трения больше 10 Н и количестве оборотов абразива выше 4000 является следствием наличия в них достаточно большого количества первичного пластификатора (60 масс.ч на 100 масс.ч полимера),

молекулы которого, проникая между полимерными цепями, уменьшают межмолекулярные силы при одновременном повышении подвижности молекул. Это приводит, как правило, к снижению прочности и модуля упругости изделия при одновременном увеличении его эластичности. Вероятно, что варьирование количества пластификатора и снижение его содержания в изделии в допустимых пределах позволит увеличить диапазон величины силы трения в аналогичных условиях испытания образцов.

#### Выводы:

- подход к моделированию абразивного износа термопластичных полиуретанов и резинотканевого материала может быть применен для прогнозирования абразивного износа материалов на основе пластифицированного поливинилхлорида;

- при силе трения меньше критической величины, которая для термопластичных полиуретанов и пластифицированного поливинилхлорида составляет порядка 3–10 Н, их абразивный износ практически совпадает, следовательно, может быть описан одними и теми же уравнениями.

#### Литература

- Barruta B, Blancheton J.P, Champagnec J.Y, Grasmick A. Mass transfer efficiency of a vacuum airlift-application to water recycling in aquaculture systems//Aquac Eng. 2012. V.46. №1. P. 18–26.
- Gao M., Wan M., Zhou X. Thermal degradation and flame retardancy of flexible polyvinyl chloride containing solid superacid//J. Thermal Analysis and Calorimetry. 2019. V. 138. №3. P. 387–396.
- Zhang C., Song B., Shan J., Ni Q., Wu F., Wang S. Design and optimization of a new tube aeration device//Aquaculture Inter. 2020. V. 28. №3. P. 985–999.
- Petrukhina N. N., Golubeva M. A., Maksimov A. L. Synthesis and Use of Hydrogenated Polymers//Russian J. Appl. Chem. 2019. V. 92. №6. P. 715–733.
- Dharmaraj M.M., Chakraborty B. C., Begum S., Natarajan R., Chandramohan S. Effect of nanoclay reinforcing filler in nitrile rubber/polyvinyl chloride blend: frequency response of dynamic viscoelasticity and vibration damping//Iranian Polym. J. 2022. V. 31. №6. P. 1247–1261.
- Колесников А.А., Дедов А.В., Шарова Л.И. Истираемость термопластичного полиуретана для эластичных резервуаров хранения топлива//Все материалы. Энциклопедический справочник 2019. №3. С. 29–33.
- Колесников А.А., Дедов А.В., Рыбаков Ю.Н., Кюннап Р.И. Истирание термопластичного полиуретана после контакта с бензином // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. №3. С. 30–35.
- Колесников А.А., Дедов А.В., Рыбаков Ю.Н., Кюннап Р.И. Влияние солнечного излучения на истирание полимерных резервуаров склада временного хранения топлива // Материаловедение. 2020. №8. С. 14–19.
- Guo A., Demydov D., Zhang W. Polyols and Polyurethanes from Hydroformylation of Soybean Oil//J. Polym. Environ. 2002. V. 10. №1–2. P. 49–52.
- Zlatanic A., Lava C., Zhang W., Petrović Z.S. Effect of Structure on Properties of Polyols and Polyurethanes Based on Different Vegetable Oils//J. Polym. Sci. Pol. Phys. 2004. V. 42. №5. P.809–816
- Chattopadhyay D. K., Raju, K.V. Structural engineering of polyurethane coatings for high performance applications//Prog. Polym. Sci. 2007. V. 32. №2. P. 352–418.
- 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.
- Рыбаков Ю.Н. Вклад в теорию и практику химмотологии в области создания полевых средств хранения горючего//Химия и технология топлив и масел. 2014. №5. С. 23–26
- Momber A. W., Irmer M. Taber abrasive wear resistance of organic offshore wind power coatings at varying normal forces//J. Coatings Technol. Res. 2021. V. 18. №7. P. 729–740.
- Nazarov, V.G., Stolyarov, V.P., Gagarin, M.V. Simulation of chemical modification of polymer surface//J. Fluorine Chem. 2014. V. 161. №5. P. 120–127.
- Nazarov V.G., Stolyarov V.P. Modified polymer substrates for the formation of submicron particle ensembles from colloidal solution// Colloid J. 2016. V. 78. №1. P. 75–82.