

EDN: NOQTDX

УДК 678.073

Experimental-Calculated Establishment of Load-Speed Modes of Operation of UHMWPE and Composite On its Basis

Olga V. Gogoleva*, **Elena S. Kolesova**,
Pavlina N. Petrova and **Roman S. Tikhonov**
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS
Federal Research Center «Yakut Science Center»
Yakutsk, Russian Federation

Received 14.03.2023, received in revised form 22.05.2023, accepted 10.08.2023

Abstract. The regularities of wear are revealed, which make it possible to determine the performance of the developed polymeric materials based on UHMWPE in bearing friction units when operating modes change. The maximum allowable modes of operation of materials are confirmed by mathematical calculations.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene, ultra-high molecular weight polyethylenecarbon fiber, carbon fiberfriction surface, friction surfacefriction coefficient, friction coefficientload, loadsliding speed, sliding speedmaximum allowable regime, maximum allowable regime.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 122011100162–9 using the scientific equipment of the Center for Collective Use of the Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Grant No. 13.ЦКП.21.0016.

Citation: Gogoleva, O.V., Kolesova, E.S., Petrova, P.N., Tikhonov, R. S. Experimental-calculated establishment of load-speed modes of operation of UHMWPE and composite on its basis. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(6), 676–684. EDN: NOQTDX



Экспериментально-расчетное установление нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации СВМПЭ и композита на его основе

**О. В. Гоголева, Е. С. Колесова,
П. Н. Петрова, Р. С. Тихонов**

*Институт проблем нефти и газа СО РАН
Федеральный исследовательский центр
«Якутский научный центр»
Российская Федерация, Якутск*

Аннотация. Выявлены закономерности изнашивания, позволяющие определить работоспособность разработанных полимерных материалов на основе СВМПЭ в подшипниковых узлах трения при изменении режимов эксплуатации. Предельно допустимые режимы эксплуатации материалов подтверждены математическими расчетами.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, углеродное волокно, поверхность трения, коэффициент трения, нагрузка, скорость скольжения, предельно допустимый режим.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ № 122011100162–9 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН, грант № 13.ЦКП.21.0016.

Цитирование: Гоголева О. В. Экспериментально-расчетное установление нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации СВМПЭ и композита на его основе / О. В. Гоголева, Е. С. Колесова, П. Н. Петрова, Р. С. Тихонов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(6). С. 676–684. EDN: NOQTDX

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) является перспективным полимером для применения в условиях Арктики ввиду наличия целого комплекса ценных свойств. Изделия, полученные из СВМПЭ, характеризуются низким коэффициентом трения, а также высокой износостойкостью. Кроме того, они обладают практически нулевым водопоглощением, высокой стойкостью к действию агрессивных сред, повышенной морозостойкостью, прочностью и ударпрочностью [1–4].

Композиты на основе СВМПЭ преимущественно применяются как износостойкие материалы технического и медицинского назначения, материалы для защиты от радиационного и СВЧ-излучения, а также в качестве футеровки емкостей, транспортного и технологического оборудования.

Многообразие конструкций узлов трения (подшипники, вкладыши, втулки, шарнирные соединения, шестеренчатые передачи, направляющие и др.) и условий их эксплуатации в машинах и механизмах не позволяет рекомендовать какой-то универсальный антифрикционный полимерный композиционный материал, обеспечивающий их высокую надежность. Основные служебные свойства подшипникового материала – антифрикционность и сопротивление усталости, так как подшипники скольжения работают с упругим скольжением, вызываемыми упругими деформациями поверхностных слоев катков [5]. Критериями для оценки антифрикционного материала служат коэффициент трения и допустимые нагрузочно-скоростные характеристики: давление P ; действующее на опору скольжения, скорость скольжения V ; параметр PV , опреде-

ляющий удельную мощность трения. Известно, что чем выше способность материала снижать температуру нагрева и нагруженность контакта, сохранять граничную смазку, тем больше допустимое значение параметра PV [6]. Взаимодействие контактирующих в трибосопряжении тел, в особенности при повышении температуры в зоне контакта, сопровождается протеканием деформационных, химических, термических и прочих процессов на поверхности контакта [7–9]. Ввиду того, что СВМПЭ является химически инертным и износостойким материалом, ограничивающим фактором в процессе трения является, прежде всего, протекание термических процессов вследствие низкой теплостойкости полимера.

В связи с этим в данной статье приведены экспериментально-расчетные результаты испытаний определения предельно допустимых условий эксплуатации разработанных полимерных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ).

Объекты и методики исследований

Объектами исследования являются СВМПЭ марки GUR 4150 (Celanese, Китай). Наполнитель – углеродное волокно (УВ) марки Белум (ОАО «СветлогорскХимволоконо», Беларусь). Образцы получали по технологии горячего прессования. Триботехнические испытания проводили на машине трения ИИ-5018 по схеме «диск-диск», контртело-сталь твердостью 45–50 HRC. Момент трения фиксировали с помощью бесконтактного индуктивного датчика, подающего электрические сигналы на цифровой милливольтметр, который показывает и записывает величину измеряемого момента трения в процессе испытания образцов, и рассчитывали коэффициент трения. Температуру в зоне контакта образец-стальное контртело определяли пирометром Mastech MS 6530B. Площадь дорожки трения вычисляли по программе ImageJ 1.46r.

В работе [10] были проведены ускоренные триботехнические испытания. Выявлено, что допустимые нагрузочно-скоростные режимы эксплуатации полимерного композита на основе СВМПЭ, модифицированного 5 мас.% УВ, при сухом трении составляют 800 Н, 600 Н, 300 Н, 200 Н при 0,2 м/с, 0,5 м/с, 0,75 м/с и 1 м/с соответственно.

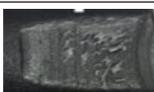
Однако ускоренные испытания не дают полного представления о том, как материал будет себя вести в реальных условиях эксплуатации, так как в результате длительного теплового воздействия протекание необратимых деформаций может интенсифицироваться при меньших нагрузках, оказываемых на изнашиваемый материал. Ускоренные испытания дают информацию о том, при каких режимах сразу начинаются необратимые деформационные процессы в материале, при котором недопустима эксплуатация изделий. В связи с этим для уточнения выбора допустимых нагрузочно-скоростных режимов, определенных ускоренными испытаниями, проведены трибоиспытания сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и полимерного композиционного материала (ПКМ) на его основе, модифицированного углеродным волокном (УВ) марки «Белум» (табл. 1) на машине трения ИИ-5018 по ГОСТ Р 50–54–107–88. Время испытания составляло 3 часа.

Обсуждение результатов

Из табл. 1 видно, что значения коэффициента трения, площади дорожек трения и температур в зоне фрикционного контакта возрастают при длительных испытаниях, что соответствует вязкоупругому поведению изнашиваемого материала во времени.

Таблица 1. Сравнение результатов триботехнических испытаний СВМПЭ и ПКМ в зависимости от метода и режимов трения

Table 1. Comparison of the results of tribotechnical tests of UHMWPE and PCM depending on the method and friction modes

Образец	Режим трения		I, мг/ч	f	T_n , °C	S, мм ²	Дорожка трения
СВМПЭ	0,2 м/с 600 Н	3 ч	0,37	0,29	78,3	75,65	
		ускоренный	-	0,14	53,0	44,7	
	0,2 м/с 700 Н	3 ч	--	--	100,2	99,79	
		ускоренный	-	0,16	65,2	54,2	
	0,5 м/с 400Н	3 ч	5,26	0,30	90,0	104,9	
		ускоренный	-	0,23	72,6	49,7	
СВМПЭ + 5 мас. % УВ	0,2 м/с 800Н	3 ч	0,10	0,17	97,8	89,76	
		ускоренный	-	0,21	68,7	66,5	
	0,5 м/с 500 Н	3 ч	1,2	0,18	92,4	70,6	
		ускоренный	-	0,21	69,2	42,3	

Проведением ускоренных трибоиспытаний было определено, что критическая нагрузка, при которой начинают развиваться процессы деформации СВМПЭ, составляет 700 Н при скорости вращения вала 0,2 м/с. Было проведено трибоиспытание при этом режиме. По истечении 30 мин образец начал деформироваться, температура в зоне трения превысила 100 °С. Установлено, что при нагрузке 600 Н при этой же скорости образец не теряет форму, максимальная температура в зоне трения составляла 78,3 °С. Выявлено, что максимальное трибонагружение при скорости скольжения вала 0,5 м/с, которое выдерживает образец СВМПЭ, составляет 400 Н.

Установлено, что полимерный композит выдерживает нагрузку 800 Н и 500 Н при скоростях вращения контртела 0,2 м/с и 0,5 м/с соответственно. Из табл. 1 видно, что поверхность трения покрыта наплывами и приобретает волнообразный вид. Видимо, за счет температурных вспышек в точках контакта происходит локальное выплавление не только материала, но и частиц износа, не успевших выйти из зоны трения. В этом случае происходят процессы самозалечивания трещин и микротрещин на поверхностях трения композита, возникших в процессе трения [11].

На основании проведенных трибоиспытаний установлены допустимые нагрузочно-скоростные режимы эксплуатации разработанных материалов. Для СВМПЭ они составляют 120–200 Н*м/с, для композита с содержанием 5 мас.% УВ марки «Белум» – 160–250 Н*м/с. На основе ускоренных трибоиспытаний и принимая во внимание разницу в показателях ускоренных и длительных испытаний можно утверждать, что при повышении скорости скольжения до 0,75 и 1 м/с температура в зоне фрикционного контакта через определенное время достигнет критического значения, после которого эксплуатация полимерных материалов на основе СВМПЭ станет недопустимой вследствие протекания необратимых пластических деформаций в поверхностном слое, приводящих к изменению размеров и формы трущегося материала.

Для подтверждения результатов определения допустимых режимов трения ПКМ на основе СВМПЭ и углеродного волокна марки «Белум» использовано математическое моделирование трибопроцесса, исходя из того, что максимально допустимая температура на рабочей поверхности в процессе трения для разработанных материалов на основе СВМПЭ составляет 100 °С [12].

Постановка задачи

Рассмотрим расчетную область испытания образцов материалов на трение и износ по схеме «диск-диск». На рис. 1 стальной диск Ω_1 на валу совершает вращательное движение, он контактируется с неподвижным образцом испытуемого полимерного композиционного материала Ω_2 , в области контакта S происходит трение.

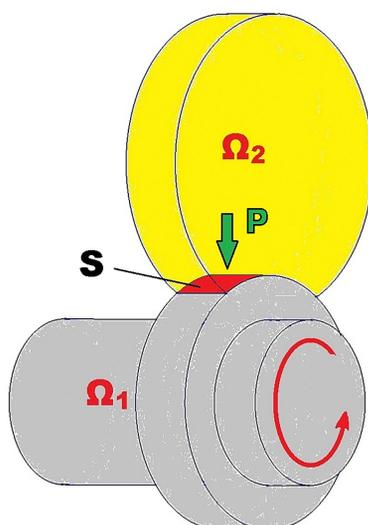


Рис. 1. Расчетная область испытания образцов на трение и износ по схеме «диск-диск»

Fig. 1. Estimated area of testing samples for friction and wear according to the “disk-disk” scheme

Представленная задача описывается трехмерным стационарным уравнением теплопроводности с фрикционным тепловыделением в зоне контакта и с конвективным членом в области контртела с валом, учитывающим скорость вращения [13]:

$$\lambda_i \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \gamma C_1 \omega \left(\frac{\partial T}{\partial y} x - \frac{\partial T}{\partial x} y \right) + Q = 0, \quad (1)$$

$$\gamma = \begin{cases} 1, & \text{при } (x, y, z) \in \Omega_1, \\ 0, & \text{при } (x, y, z) \in \Omega_2. \end{cases}$$

Мощность источника теплоты в зоне контакта, возникающей в результате трения, определяется по формуле

$$Q = f F w_{disk} \cos(\varphi) \delta(x - \bar{x}) \delta(y - \bar{y}) \delta(z - \bar{z}), \quad (2)$$

$$(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \in S, \quad -\varphi_0 < \varphi < \varphi_0,$$

где T – температура; x, y, z – декартовы координаты; λ_i – коэффициент теплопроводности; $i = 1$ в области Ω_1 , $i = 2$ в области Ω_2 ; C_1 – объемная теплоемкость стального диска; ω – угловая скорость вращения контртела; w_{disk} – линейная скорость; φ_0 – угол контакта; F – сила поджатия.

В начальный момент времени пара трения имеет однородное распределение температуры окружающей среды T_0 , на границах задаются граничные условия первого и третьего рода, на подвижных свободных поверхностях, в зависимости от скорости вращения контртела, вычисляется коэффициент конвективного теплообмена с окружающей средой α_i [14].

Для выполнения граничного условия первого рода на одном конце вала в расчете осуществляется замер температуры на поверхности вала, поскольку происходит отвод тепла к машине трения через стальной вал. Чтобы избежать замера температуры на поверхности вала на последующих экспериментах, на расчетной модели удлинен вал на Δ , который будет имитировать теплоотвод к машине трения.

Сравнение результатов трибоиспытаний и вычислительных экспериментов

Поставленная задача решалась методом конечных элементов с использованием пакета программы свободного доступа Dolphin/FEniCS. Разбиение расчетных областей Ω_1 и Ω_2 на конечные объемы в форме тетраэдров осуществлялось программой GMSH. Вычислительные эксперименты проводились при следующих геометрических размерах: радиус диска из полимерного композиционного материала составлял 0,027 м, радиус стального диска – 0,023, толщина дисков образца и контртела – 0,012 м, стальной диск жестко закреплен к валу с радиусом 0,015 м, который выступает слева и справа от диска на 0,038 и 0,01 м соответственно.

Сила поджатия композиционного материала к стальному диску составляла 800 Н, скорость вращения 0,2 м/с и 500 Н – при 0,5 м/с. Продолжительность эксперимента составила 3 часа, после чего максимальная температура на выходе из скользящего контакта равнялась около 97,8 и 92,4 °С; площадь следа трения 89,76 и 70,6 мм², коэффициент трения регистрировался машиной трения и равнялся 0,17 и 0,18 соответственно (табл. 1).

В расчетах приняты следующие значения теплофизических характеристик материалов. Объемная теплоемкость и теплопроводность стали контртела: $C_1 = 3,7 \cdot 10^6$ Дж/(м³·°С),

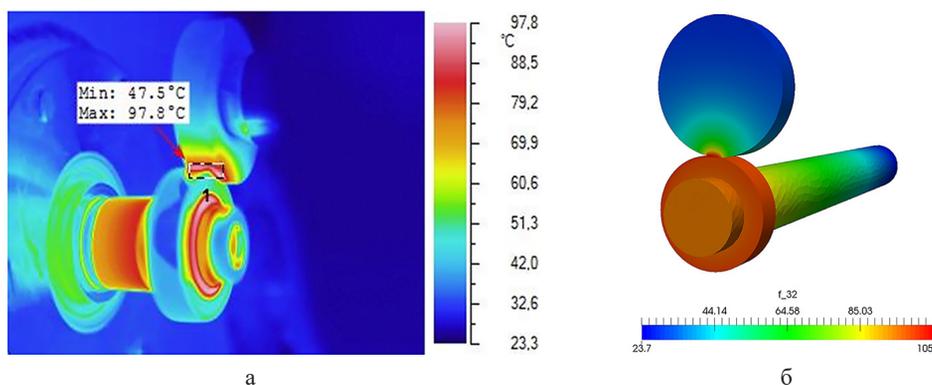


Рис. 2. Распределение температур: а – тепловизионный снимок стенда испытаний ПКМ в момент времени 180 минут (0,2 м/с 800 Н); б – расчет по математической модели

Fig. 2. Temperature distribution: a – thermal image of the PKM test stand at the time of 180 minutes (0.2 m/s 800 N); b – calculation according to the mathematical model

$\lambda_l = 45,4$ Вт/(м·°С), коэффициент теплопроводности исследуемого композита принимался равным $0,42$ Вт/(м·°С), рассчитанный согласно уравнению Максвелла для двухфазных систем [15].

На рис. 2 представлены температурные поля, полученные с помощью тепловизора марки NEC TN7102WV и рассчитанные математическим аппаратом, в конечный момент времени максимальная температура на выходе из зоны трения составляла $97,8$ и $97,2$ °С соответственно.

Поскольку в математической модели не учитывается напряженно-деформированное состояние при высоких нагрузках и также не учитывается фазовый переход композита при высоких температурах в зоне трения, результаты расчетов при фрикционной температуре, превышающей предельно допустимую рабочую температуру композиционного материала, будут иметь значительную погрешность вычисления. Тем не менее адекватность математической модели для композиционного материала СВМПЭ + 5 мас.% марки «Белум» подтверждается сопоставлением расчетных и экспериментальных результатов при фрикционной температуре до 100 °С.

Таким образом, математическими расчетами подтверждены экспериментально установленные предельные нагрузочно-скоростные режимы для композита на основе СВМПЭ при скорости скольжения вала $0,2$ м/с.

Заключение

На основании проведенных трибоиспытаний на машине трения ИИ-5018 по схеме, имитирующей работы подшипников скольжения, установлены допустимые нагрузочно-скоростные режимы эксплуатации СВМПЭ и композита на его основе. Для СВМПЭ они составляют 120 – 200 Н*м/с, для композита с содержанием 5 мас.% УВ марки «Белум» – 160 – 250 Н*м/с. Предельный нагрузочно-скоростной режим эксплуатации ПКМ был подтвержден вычислительными расчетами математической модели процесса трибосопряжения. Полученные данные позволяют сформулировать рекомендации по практическому применению разработанных материалов в различных трибоузлах, где используются полимерные подшипники скольжения.

Список литературы / References

- [1] Селютин Е. Г., Гаврилов Ю. Ю., Воскресенская Е. Н. и др. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования. *Химия в интересах устойчивого развития* [Selyutin E. G., Gavrilov Yu. Yu., Voskresenskaya E. N. et al. Composite materials based on ultra-high molecular weight polyethylene: properties, prospects of use. *Chemistry in the interests of sustainable development*], 2010, 18, 375–388.
- [2] Валуева М. И., Колобков А. С., Малаховский С. С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор). *Труды ВИАМ* [Valueva M. I., Kolobkov A. S., Malakhovsky S. S. Ultra-high molecular weight polyethylene: market, properties, directions of application (review). *Works of VIAM*], 2020, 3 (97), 49–57.
- [3] Галибеев С. С., Хайруллин Р. З., Архиреев В. П. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Тенденции и перспективы. *Вестник Казанского технологического университета* [Galibeev S. S., Khairullin R. Z., Arkhireev V. P. Ultra-high molecular weight polyethylene. Trends and prospects. *Bulletin of Kazan Technological University*], 2008, 2, 50–55.
- [4] Панин С. В., Корниенко Л. А., Алексенко В. О., Иванова Л. Р., Шилько С. В. Сравнение эффективности углеродных нано- и микроволокон в формировании физико-механических и триботехнических характеристик полимерных композитов на основе высокомолекулярной матрицы. *Известия вузов. Химия и хим. технология* [Panin S. V., Kornienko L. A., Aleksenko V. O., Ivanova L. R., Shilko S. V. Comparison of the efficiency of carbon nano- and microfibers in the formation of physico-mechanical and tribotechnical characteristics of polymer composites based on a high-molecular matrix. *News of universities. Chemistry and chemical technology*], 2016, 59(9), 99–105.
- [5] Мышкин Н. К., Петроковец М. И. *Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии*. М.: Физматлит [Myshkin N. K., Petrokovets M. I. *Friction, lubrication, wear. Physical foundations and technical applications of tribology*. Moscow, Fizmatlit], 2007. 368 с.
- [6] Мышкин Н. К., Петровковец М. И., Ковалев А. В. Трибология полимеров: адгезия, трение, изнашивание и фрикционный перенос. *Трение и износ* [Myshkin N. K., Petrovkvets M. I., Kovalev A. V. Tribology of polymers: adhesion, friction, wear and friction transfer. *Friction and wear*], 2006, 27(4), 429–443.
- [7] *Трение, изнашивание и смазка. Справочник*. Кн. 1. Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисына. М.: Машиностроение [Friction, wear and lubrication. Guide. Book 1. Edited by I. V. Kragelsky, V. V. Alisin. Moscow, Mechanical Engineering], 1978. 400 с.
- [8] *Основы трибологии: учебник для технических вузов. 2-е изд. переработ., и доп.* / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше и др.; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение [Fundamentals of Tribology: textbook for technical universities. 2nd ed. pererobot., and add. / A. V. Chichinadze, E. D. Brown, N. A. Boucher, etc.; under the general ed. A. V. Chichinadze. Moscow, Mechanical Engineering], 2001. 664 с.
- [9] Myshkin N. K., Kovalev A. V. Adhesion and surface forces in polymer tribology – A review. *Friction*, 2018, 6(2), 143–155.
- [10] Гоголева О. В., Петрова П. Н., Колесова Е. С. Определение предельно допустимых режимов трения СВМПЭ и ПКМ на его основе, модифицированного углеродными волокнами. *Все материалы. Энциклопедический справочник* [Gogoleva O. V., Petrova P. N.,

Kolesova E. S. Determination of the maximum permissible friction modes of UHMWPE and PCM based on it, modified with carbon fibers. *All materials. Encyclopedic reference*, 2023, 2, 32–37.

[11] Бочкарева С. А., Панин С. В., Люкшин Б. А. и др. Моделирование фрикционного износа полимерных композиционных материалов с учетом температуры контакта. *Физическая мезомеханика* [Bochkareva S. A., Panin S. V., Lyukshin B. A., etc. Modeling of frictional wear of polymer composite materials taking into account the contact temperature. *Physical Mesomechanics*], 2019, 22(1), 54–68.

[12] Богданович П. Н., Ткачук Д. В. Тепловые и термомеханические явления в контакте скольжения. *Трение и износ* [Bogdanovich P. N., Tkachuk D. V. Thermal and thermomechanical phenomena in sliding contact. *Friction and wear*], 2009, 20(3), 214–229.

[13] Старостин Н. П., Тихонов А. Г., Моров В. А., Кондаков А. С. *Расчет триботехнических параметров в опорах скольжения*. Якутск, Изд-во ЯНЦ СО РАН [Starostin N. P., Tikhonov A. G., Morov V. A., Kondakov A. S. *Calculation of tribotechnical parameters in sliding supports*. Yakutsk, Publishing house of the YaSC SB RAS], 1999. 276 с.

[14] Зайнуллин Л. А., Калганов Н. В., Калганов Д. В., Ярчук В. Ф. Исследование эффективности охлаждения вращающегося вала печного высокотемпературного вентилятора. *Известия вузов. Черная металлургия* [Zainullin L. A., Kalganov N. V., Kalganov D. V., Yarchuk V. F. Investigation of the cooling efficiency of the rotating shaft of the furnace high-temperature fan. *News of universities. Ferrous metallurgy*], 2015, 58(9), 662–665.

[15] Shi W., Dong H., Bell T. Tribological Behaviour and Microscopic Wear Mechanisms of UHMWPE Sliding Against Thermal Oxidation-Treated Ti6Al4V. *Materials Science and Engineering*, 2000, 291(1–2), 27–36.