

DOI: 10.17516/1999-494X-0318

УДК 539.621

Thermal Conducting Properties of Metal-fluoroplastic Material Determined by Tribological Method

Vasily N. Kornopoltsev^a and Bair B. Damdinov^{*b}

*^aBaikal Institute of Nature Management SB RAS
Ulan-Ude, Russian Federation*

*^bSiberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 12.04.2021, received in revised form 11.05.2021, accepted 21.06.2021

Abstract. The work is devoted to considering the possibility of using the Fourier law and the data of tribological tests for the approximate determination of the thermophysical characteristics of the sheet metal-fluoroplastic material on a steel substrate. The thermal conductivity coefficient of two different fluoroplastic materials was determined by tribological method using the temperature difference in the friction zone. It was shown that friction conditions change from viscoelastic to plastic.

Keywords: tribology, thermal physics, thermal conductivity coefficient, viscoelasticity, rheology, sheet metal-fluoroplastic material.

Citation: Kornopoltsev V. N., Damdinov B. B. Thermal conducting properties of metal-fluoroplastic material determined by tribological method, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(4), 378–384. DOI: 10.17516/1999-494X-0318

Определение теплопроводных свойств металлофторопластового материала трибологическим методом

В. Н. Корнопольцев^а, Б. Б. Дамдинов^б

*^аБайкальский институт природопользования СО РАН
Российская Федерация, Улан-Удэ*

*^бСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Работа посвящена рассмотрению возможности использования закона Фурье и данных триботехнических испытаний для определения теплофизических характеристик листового металлофторопластового материала на стальной подложке. Определен коэффициент теплопроводности двух различных металлофторопластовых материалов, учитывая разницу температур в зоне трения и с обратной стороны вкладыша в критический (переходный) период трения. Показано изменение условий трения от вязкоупругого к пластическому.

Ключевые слова: трибология, теплофизика, коэффициент теплопроводности, вязкоупругость, реология, листового металлофторопластовый материал.

Цитирование: Корнопольцев, В. Н. Определение теплопроводных свойств металлофторопластового материала трибологическим методом / В. Н. Корнопольцев, Б. Б. Дамдинов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(4). С. 378–384. DOI: 10.17516/1999-494X-0318

Введение

При разработке новых материалов триботехнического назначения всегда остаются нерешенные задачи в определении более полных характеристик материалов. В работах [1, 2] был предложен метод получения листового металлофторопластового материала (ЛМФМ), разработан способ управления триботехническими и физико-механическими характеристиками рабочего слоя за счет формирования на стальной подложке пористого бронзового слоя заданной структуры в зависимости от нагрузочно-скоростного фактора эксплуатации будущей опоры скольжения. В работе [2] показано, что для преодоления допустимой скорости скольжения при трении без смазочных материалов опор скольжения из ЛМФМ необходимо уменьшать в рабочем слое объем бронзовой составляющей. Этого можно достичь получением на стальной подложке «столбчатого» слоя, отвечающего принципу Шарпи. Получен материал, у которого в рабочем слое объем бронзовой составляющей занимает 10–15 %. Установлено [2], что при этом рабочий слой сохраняет достаточную несущую способность, а допустимая скорость скольжения увеличивается более чем в 3 раза.

Однако возникает вопрос, как изменяется коэффициент теплопроводности материала с уменьшением объема бронзы. Целью данной работы стала попытка использования экспериментальных данных триботехнических испытаний для ориентировочного определения теплофизических характеристик нового материала.

Материалы и методы

Испытанию подвергали два листовых металлофторопластовых материала на подложке, толщиной 1 мм, из низкоуглеродистой стали 20:

1) с пористым бронзовым слоем, сформированным предварительным припеканием бронзолатунной сетки. Толщина слоя на момент снятия показаний для построения зависимостей температуры и коэффициента трения составляла 0,50 мм;

2) с пористым бронзовым слоем, сформированным в виде упорядоченных столбцов из спекаемой смеси высокодисперсных порошков меди и олова (85*15 масс.%). Толщина слоя на момент снятия показаний составляла 0,20 мм. Объем, занимаемый бронзовым каркасом в рабочем слое, не превышает 15 %.

Свободное пространство бронзового слоя в обоих случаях заполнено композицией на основе ПТФЭ со свинцом (65*35 масс.%).

Трибоиспытания проводили по схеме вращающийся вал – неподвижный частичный вкладыш на машине трения СМТ-1 ($V = 3$ м/с). В качестве контртела использовалась диффузионно-борированная втулка из стали 45. Показания снимали на 2-й час работы при установившихся параметрах трения с последующим увеличением нагрузки.

Дифференциально-сканирующая калориметрия проведена на синхронном термоанализаторе STA 449 C Jupiter фирмы NETZSCH (Германия).

Обсуждение

В работе [3] показано, что ленточный металлофторопластовый материал промышленного производства, бронзовый слой которого формируют припеканием свободно насыпанного слоя из сферической бронзы, имеет пористость до 30 об.% и теплопроводность материала по мере износа изменяется от 17 до 32 Вт/м град. В данной работе рассматриваются материалы с иной структурой бронзового слоя, которая позволила в отличие от промышленного аналога провести длительные испытания материалов на износ с выявлением определенных параметров в возможности управления эксплуатационными свойствами ЛМФМ. Так, в работе [2] показано, что при соблюдении принципа Шарпи материал (№ 2) имеет величину нагрузочно-скоростного фактора, определенную по предельно допустимой температуре трения 523 К, на порядок выше, чем у промышленного аналога марки DU [4].

Весьма интересным результатом исследований стало определение зависимости коэффициентов трения и температуры с обратной стороны вкладыша разработанных материалов (рис. 1).

Как видно на рис. 1, зависимости коэффициентов трения от нагрузки имеют минимумы. Снижение коэффициента трения при увеличении нагрузки, как известно [4, 5], связано с природой ПТФЭ, а минимум и рост коэффициента трения с последующим увеличением давления обусловлен переходом условий трения от вязко-упругого до пластического [6], а также возможным эффектом сплавления [7]. По нашему мнению, это связано с исчезновением в зоне сопряжения промежуточного слоя из продуктов трибодеструкции ПТФЭ-композиции, образование которого в момент устойчивого трения при температурах ниже 530 К подтверждается ИК-спектральными и рентгенофазовыми исследованиями [8].

Дополнительные ТГ исследования продуктов износа, собранных с поверхности трения ЛМФМ в период устойчивого трения (рис. 2), показали, что первая интенсивная потеря массы навески начинается при температуре 543 К, при температуре 583 К наблюдается экзотермический пик фазового перехода второго рода. По рис. 1 можно определить, что минимум коэффициентов

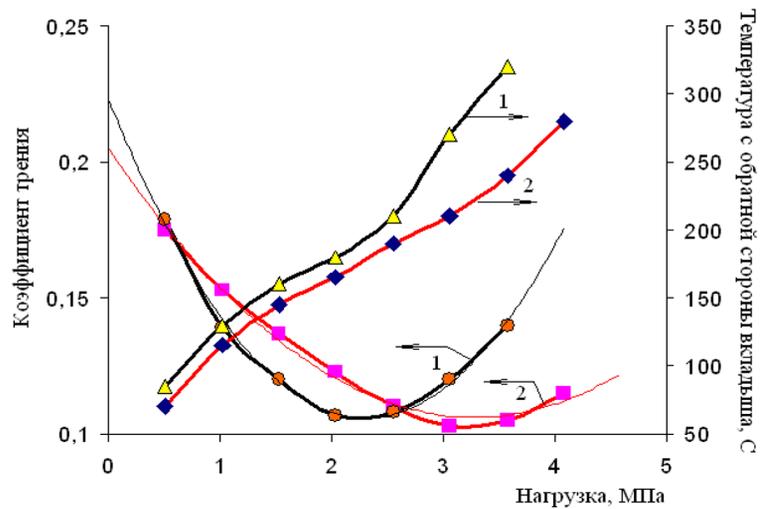


Рис. 1. Триботехнические испытания разработанных ЛиАМ ($V=3$ м/с): 1 – ЛиАМ с пористым бронзовым слоем из бронзолатунной сетки; 2 – ЛиАМ с пористым бронзовым слоем столбчатой структуры, полученный синтезом медь-оловянной (85:15) смеси

Fig. 1. Tribotechnical tests developed by ASM ($V = 3$ m / s): 1 – ASM with a porous bronze layer of brass-brass mesh; 2 – ASM with a porous bronze layer of a columnar structure, obtained by the synthesis of a copper-tin (85:15) mixture

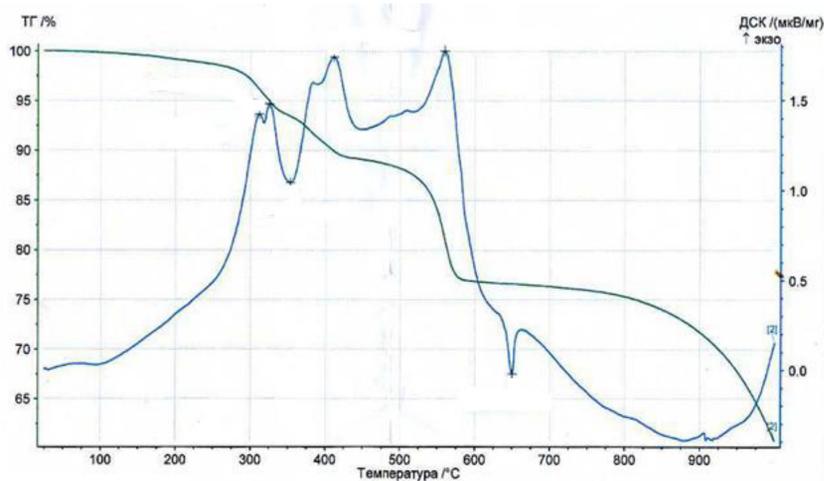


Рис. 2. График термического анализа и дифференциально-сканирующей калориметрии продуктов износа ЛМФМ желтого цвета, собранных в период устойчивого трения

Fig. 2. Graph of thermal analysis and differential scanning calorimetry of yellow ShAM wear products collected during a period of stable friction

трения при переходе от упругого трения к пластическому наблюдается при температуре с обратной стороны вкладышей (T_2) в области 468 и 493 К соответственно для двух материалов.

Очевидна взаимосвязь температур в переходный период как разница между температурой в зоне трения и температурой с обратной стороны вкладыша. Как известно, уравнение Фурье связывает разницу температур и толщину материала коэффициентом теплопроводности, и, ис-

пользуя полученные данные, в первом приближении можно определить коэффициент теплопроводности металлофторопластового вкладыша.

Постановка тепловой задачи трения

ЛМФМ в отличие от полимерных подшипников лишены недостатков высокого линейного расширения и низкой теплопроводности, которые могут существенно повлиять на характеристики контакта и распределения давления, поэтому для подшипников из ЛМФМ большее значение имеет стационарный режим при установившемся трении.

Рассмотрим трибосистему, состоящую из металлофторопластового вкладыша и стального вала, как контртела. Для решения задачи сделаем следующие допущения:

– За счет малой толщины вкладыша из ЛМФМ (h) рассматривается одномерная линейная задача распределения тепла через вкладыш и стальной вал.

– Так как на поверхности стального контртела в результате массопереноса фторопластовой композиции образуется устойчивая пленка, выглаживающая шероховатую поверхность металла, общая номинальная (геометрическая) площадь контакта принимается за расчетную.

– В расчете рассматривается один слой трибосистемы, т. е. принимается допущение, что теплопроводность материала, включающего стальную подложку и рабочий слой, однородна по толщине слоя, т.е. определяется теплопроводность материала в целом.

– Так как трибосистема при трении стремится к уравниванию, то и градиенты температуры должны уравниваться. При трении представленной системы в этом немаловажную роль играет пленка массопереноса, которая усредняет величины отвода тепла через стальной вал и подшипник из ЛМФМ. В данном случае ее можно рассматривать как теплоизоляционную. Причем РФА продуктов массопереноса [8], собранных с поверхности трения стального контртела, показывают преобладающее наличие чистого ПТФЭ ($\lambda=0,25$ Вт/м К). Можно сделать смелое предположение, что направление массопереноса тесно связано с разницей градиентов температуры и коэффициента распределения тепловых потоков между деталями сопряженной пары. Эффект безызносности достигается при сбалансировании этих параметров, т. е. в расчетах коэффициент распределения теплового потока α принимается равным 0,5.

Итак, при трении предлагаемой трибосистемы при установившемся трении уравнение Фурье запишется в виде

$$\sum_{k=1}^n \lambda_{1k} \frac{\partial T_{1k}}{\partial x_{1k}} = \sum_{i=1}^n \lambda_{2i} \frac{\partial T_{2i}}{\partial x_{2i}} = -\frac{fpv}{2}.$$

При $n=1$ $\lambda = fpvh/2\Delta T$.

Для расчета использовали две ближайшие точки переходного периода с учетом температур в зоне трения (T_1), соответствующих началу и концу деструкции фторопластовой композиции промежуточного «третьего тела» в зоне трения (рис. 2). Данные расчетов сведены табл. 1.

Заключение

Данные расчетов показывают вполне объективные результаты. Разницу коэффициентов теплопроводности у двух различных по конструкции ЛМФМ можно объяснить с учетом

Таблица 1. Расчетные параметры и величина теплопроводности ЛМФМ

Table 1. Calculated parameters and value of thermal conductivity of ShAM

№ ЛМФМ	$p \nu$ МПа м/с	T_1 К	T_2 К	ΔT К	h , м	f	λ , Вт/м К
1	2:3	543	453	90	0,0015	0,11	5,86
	2,5:3	583	483	100		0,115	6,19
2	3:3	543	483	60	0,0012	0,1	9,0
	3,5:3	583	513	70		0,105	9,45

разницы толщин рабочих слоев исследованных материалов. Увеличение коэффициента теплопроводности при увеличении нагрузки может свидетельствовать о влиянии наличия и отсутствия промежуточного третьего тела на процесс теплообмена. При его отсутствии увеличивается контакт металлов бронзовых выступов рабочего слоя ЛМФМ и стального контртела.

Благодарности / Acknowledgements

Работа выполнена в рамках госзадания БИП СО РАН № 0273–2021–0007 и при поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20–42–240015 p_a_Красноярск.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the BIP SB RAS No. 0273–2021–0007 and with the support of the Russian Foundation for Basic Research, Government of Krasnoyarsk Region, Krasnoyarsk Region Scientific Foundation, project No. 20–42–240015 r_a_Krasnoyarsk.

Список литературы / References

[1] Корнопольцев В. Н., Корнопольцев Н. В., Могнонов Д. М. Испытания металлофторопластовых листовых антифрикционных материалов при скоростях скольжения до 3 м/с. *Трение и износ* 2009, 30(4), 385–389. [Kornopoltsev V. N., Kornopoltsev N. V., Mogonov D. M. Testing of Metal–Fluoroplastic Sheet Antifricition Materials at up to 3 mps Sliding Velocities. *Friction and wear* 2009, 30(4), 281–284 (in Russian)]

[2] Корнопольцев В. Н. Листовой антифрикционный материал с заданной структурой припеченного пористого слоя. *Трение и износ* 2010, 31(5), 479–484 [Kornopoltsev V. N. Sheet Antifricition Materials with Specified Structure. *Friction and wear* 2010, 31(5), 479–484 (in Russian)]

[3] Семенов А. П., Савинский Ю. В. *Металлофторопластовые подшипники*. М.: Машиностроение, 1976. 192 с. [Semenov A. P., Savinsky Yu. V. *Fluoroplastic bearings*. М., Mashinostorenie, 1976. 192 p. (in Russian)]

[4] Боуден Ф.П., Тейбор Д. *Трение и смазка*. Пер. с англ.; под ред. И. В. Крагельского. М.: Машгиз, 1969. 542 с. [Bowden F. P., Tabor D. *The Friction and Lubrication of Solids*. New York, Oxford Univ. Press, 1950. 337 p. (in Russian)]

[5] Чегодаев Д. Д. *Фторопласты*. Л.: Госхимиздат, 1956. 86 с. [Chegodayev D. D. *Fluoroplastics*. L., Goskhimizdat, 1956. 86 p. (in Russian)]

[6] Гаркунов Д. Н. *Триботехника*. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1989. 328 с. [Garkunov D. N. *Tribotechnics: a textbook for students of technical colleges*. 2nd ed. M., Mechanical engineering, 1989. 328 p. (in Russian)]

[7] Sagdoldina Zh.B. et al. The study of the fine structure of Ti-Al coating on the surface of Ti obtained by mechanical alloying. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics*. 2020, 13(4), 459–465.

[8] Kornopoltsev V.N., Mogonov D.M., Ayurova O. Zh. Investigation of tribological properties of sheet metalfluoroplastic materials. *Letters on materials* 2018, 8(3), 235–239.