

КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА ПО СТАЛИ 08X18H10T

Караваяев Д. М.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, kmcm@ya.ru

Описана лабораторная машина для трибологических испытаний по схеме «палец-диск». Исследовано влияние содержания модифицированной силиконовой смолы и давления на коэффициент трения композиционных материала на основе терморасширенного графита при скорости скольжения образца 0,01 м/с. Исследования проведены в соответствии с методикой планирования экспериментов. Получены регрессионные уравнения. Установлено, что увеличение содержания модифицированной силиконовой смолы в композиционных материалах на основе терморасширенного графита с насыпной плотностью 200 ± 10 кг/м³ приводит к увеличению коэффициента трения, в то время как в композиционных материалах на основе графита с насыпной плотностью от 14 ± 1 кг / м³ не влияет. С увеличением давления коэффициент трения уменьшается. Используемые в статье оборудование для определения коэффициента трения и методику эксперимента возможно применять не только для материала, описанного в статье, но и для других, например, фторопласта, полиэтилена, полиамида и композиций на их основе.

Ключевые слова: терморасширенный графит, модифицированная силиконовая смола, композиционный материал, трение, трибологические свойства, коэффициент трения.

THE COEFFICIENT OF FRICTION COMPOSITE MATERIALS BASED ON EXPANDED GRAPHITE ON STEEL 08X18H10T

Karavaev D. M.

Perm national research polytechnic university, Russia, Perm, 614990, Komsomolsky Av. 29, kmcm@ya.ru

Laboratory machine for tribological tests on a "pin-on-disk" is described. Effect of a modified silicone resin and the pressure on the friction coefficient of composite material based on expanded graphite sliding speed sample 0.01 m / s is investigated. Investigations were carried out according to the method of design of experiments. Regression equations were obtained. Results showed that with increasing content of the modified silicone resin in the composite material based on expanded graphite with a bulk density of 200 ± 10 kg/m³ friction coefficient is increased, while in the composite materials based on expanded graphite with a bulk density of 14 ± 1 kg/m³ did not affect. It was also found that with increasing pressure of the friction coefficient decreases. It was also found that with increasing pressure of the friction coefficient decreases. Equipment used in the paper for determining the coefficient of friction and experimental technique, may be applied to other materials, such as fluoroplastic, polyethylene, polyamide and compositions thereof.

Keywords: expanded graphite, modified silicone resin, composite material, friction, tribological properties, friction coefficient.

В настоящее время в химической, нефтеперерабатывающей, энергетической и других отраслях промышленности существует ряд проблем, связанных с использованием традиционных шаровых кранов в качестве запорной арматуры. В условиях интенсивной эксплуатации, предполагающей переработку горячих жидкостей и газов при высоких давлениях и при температурах до 500–550°C, одним из факторов, ограничивающих надежность шаровых кранов, является недостаточная термостойкость уплотнения в области контакта пары «шар-седло» [8]. Одним из важнейших показателей работы уплотнений шаровых кранов является усилие, затрачиваемое на поворот шара, которое зависит от

коэффициента трения.

Материалы и методы исследования

Коэффициент трения тестовых образцов по сухой поверхности образца из стали 08X18H10T с твердостью 50 HRC и шероховатостью $Ra=0,84$ мкм определялся на машине трения по схеме «палец-диск» (рис. 1) при комнатной температуре, давлениях в контакте 1 МПа и 5 МПа, скорости скольжения: 0,01 м / сек, комнатной температуре, относительной влажности 25 %–35 %. Подробнее методика измерения коэффициентов трения изложена в предыдущих работах [5, 9].

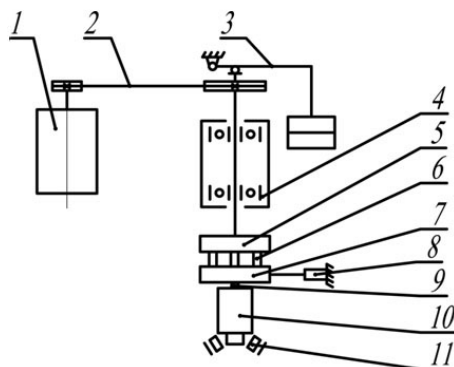


Рис. 1. Лабораторная машина для трибологических испытаний по схеме «палец-диск»: 1 – электродвигатель; 2 – ременная передача; 3 – устройство для нагружения; 4 – опора; 5 – планшайба с держателем; 6 – образец-палец; 7 – контртело-диск с рычагом; 8 – тензометрический датчик силы; 9 – шарик; 10 – стойка; 11 – подшипник

Испытания при скорости скольжения 0,01 м/с были проведены поворотом планшайбы с пальцами на 90° и возвращением. Запись 50 циклов испытания «поворот и возврат» реализуются с помощью специально разработанного программного обеспечения. Перед каждым испытанием движущиеся части машины для испытания по схеме «палец-диск» охлаждали до комнатной температуры, а стальной диск был очищен с помощью ацетона и сжатым воздухом. Значение силы трения в ходе испытаний контролировали и записывали через систему сбора данных на компьютер, что позволяет рассчитывать коэффициент трения.

Образцы композиционного материала были произведены при тщательном смешивании порошков и одностороннем сжатии компонентов смеси, которые были размещены в удлиненной вертикальной форме, со съемным дном [7]. Порошок терморасширенного графита (ТРГ) был получен измельчением в две стадии [3, 4, 6]. На I стадии измельчения при использовании элементов измельчителя с гладкой поверхностью был получен порошок ТРГ с насыпной плотностью 14 ± 1 кг/м³ [3, 4]. На II стадии измельчение при использовании элементов измельчителя с режущими кромками был получен порошок ТРГ с насыпной плотностью 200 ± 10 кг/м³ [3, 6]. Композиционные материалы на основе ТРГ

были спрессованы при давлении в диапазоне 30–90 МПа в течение 60 сек, а затем термообработаны в течение 30 мин при 200 ± 10 °С.

Исследования проводили в соответствии с методикой планирования экспериментов. Каждую из серий испытаний выполняли в рамках полного факторного эксперимента. Факторы содержания модифицированной силиконовой смолы и давление Р задавали на двух уровнях (минимальном и максимальном). Каждый эксперимент при выбранной комбинации факторов повторяли по 3 раза. Чтобы исключить влияние случайных ошибок, вызванных внешними условиями (переменной температуры, качеством сырья, квалификацией лаборанта и т. д.), рандомизировали опыты во времени, т.е. очередность их проведения выбирали случайным образом.

Для построения зависимостей коэффициента трения от давления Р и содержания модифицированной силиконовой смолы в композиционном материале использовали математическую модель первого порядка в виде полинома [2]

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j. \quad (1)$$

Факторы кодировали по формуле

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (2)$$

где X_i – кодовое значение i -го фактора; x_i – натуральное текущее значение i -го фактора; x_{i0} – начальный (нулевой) уровень фактора; Δx_i – интервал варьирования i -го фактора:

$$\Delta x_i = \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{2} \quad (3)$$

При проведении исследований по определению триботехнических характеристик [9, 10] использовали Симплекс-вершинный план эксперимента с дополнительными внутренними точками. По этому плану содержания модифицированной силиконовой смолы в композиционных материалах были 10, 20, 30, 40 и 50 масс. %. Т.к. при 10 и 50 масс. % определяемые характеристики отклонялись от линейного закона, то они были исключены из плана эксперимента. Значения выбранных уровней варьируемых факторов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни варьирования факторов

№ п/п	Уровень варьируемых факторов	Обозначение кодированное	п, %	Р, МПа
			X_1	X_2
1	Основной	0	30	3
2	Интервал варьирования	Δx	10	2
3	Нижний	-1	20	1
4	Верхний	+1	40	5

Матрица планирования для экспериментального плана 2^2 представлена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}	\bar{y}_u
1	+1	-1	-1	+1	y_{11}	y_{21}	y_{31}	\bar{y}_1
2	+1	+1	-1	-1	y_{12}	y_{22}	y_{32}	\bar{y}_2
3	+1	-1	+1	-1	y_{13}	y_{23}	y_{33}	\bar{y}_3
4	+1	+1	+1	+1	y_{14}	y_{24}	y_{34}	\bar{y}_4

Результаты исследования и их обсуждение

Типичное изменение коэффициента трения по отношению к времени испытания образцов из композиционных материалов на основе ТРГ показано на рис. 2. При испытаниях на скорости скольжения 0,01 м/с установлено (рис. 2), что коэффициент трения возрастает с увеличением числа циклов, а затем стабилизируется.

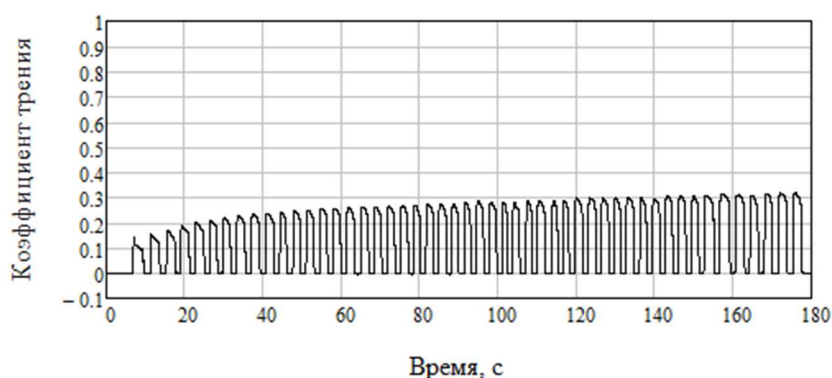


Рис. 2. Изменение коэффициента трения по отношению к времени испытания образцов композиционных материалов на основе ТРГ. Испытание проводили при скорости скольжения 0,01 м/с

Результаты экспериментов, а также результаты их статистической обработки, а именно – средние значения коэффициента трения (\bar{y}_u), дисперсия параллельных опытов – S^2 , средняя квадратичная ошибка одиночного результата при n измерениях – S_n , коэффициент вариации – W_n , средняя квадратичная ошибка среднего арифметического – $S_{n\bar{y}}$, доверительный интервал среднего арифметического – Δy , расчетные коэффициенты трения \hat{y}_u , найденные по уравнениям регрессии, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты экспериментов определения коэффициента трения

№	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}	\bar{y}_u	S^2	S_n	$W_n, \%$	$S_{n\bar{y}}$	$\Delta y_{\alpha=0,95}$	\hat{y}_u
Композиционный материал на основе ТРГ с насыпной плотностью $14 \pm 1 \text{ кг/м}^3$										
1	0,298	0,318	0,308	0,308	$9,7 \times 10^{-5}$	$9,9 \times 10^{-3}$	3,20	$5,7 \times 10^{-3}$	0,024	0,314
2	0,308	0,321	0,338	0,322	$2,4 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-2}$	4,78	$8,9 \times 10^{-3}$	0,038	0,314
3	0,255	0,257	0,255	0,256	$7,8 \times 10^{-7}$	$8,8 \times 10^{-4}$	0,35	$5,1 \times 10^{-4}$	0,002	0,254

4	0,255	0,264	0,259	0,259	$2,1 \times 10^{-5}$	$4,6 \times 10^{-3}$	1,77	$2,7 \times 10^{-3}$	0,011	0,254
5*	0,290	0,280	0,300	0,290	$1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-2}$	3,45	$5,8 \times 10^{-3}$	0,025	0,284
Композиционный материал на основе ТРГ с насыпной плотностью 200 ± 10 кг/м ³										
1	0,316	0,324	0,320	0,320	$1,5 \times 10^{-5}$	$3,9 \times 10^{-3}$	1,22	$2,3 \times 10^{-3}$	0,010	0,320
2	0,337	0,359	0,351	0,349	$1,2 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-2}$	3,14	$6,3 \times 10^{-3}$	0,027	0,348
3	0,254	0,270	0,260	0,261	$6,3 \times 10^{-5}$	$8,0 \times 10^{-3}$	3,05	$4,6 \times 10^{-3}$	0,020	0,260
4	0,283	0,301	0,278	0,287	$1,5 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-2}$	4,21	$7,0 \times 10^{-3}$	0,030	0,288
5*	0,298	0,277	0,314	0,296	$3,4 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-2}$	6,26	$1,1 \times 10^{-2}$	0,046	0,304

Статистическая обработка данных коэффициентов трения композиционных материалов на основе ТРГ с насыпной плотностью 14 ± 1 кг/м³ показала, что дисперсия параллельных опытов не превышала $S^2 \leq 2,37 \times 10^{-4}$. Для определения возможности регрессионного анализа рассчитали однородность дисперсий параллельных опытов по критерию Кохрена [2]. Так как расчетные значение критерия Кохрена $Gr=0,6654$ меньше табличного $G_{табл}=0,7679$ [1], при уровне значимости $\alpha=0,05$, то гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов принимается, и значит возможно проведение регрессионного анализа.

Соответственно, обработка данных коэффициентов трения композиционных материалов на основе ТРГ с насыпной плотностью 200 ± 10 кг/м³ показала, что дисперсия параллельных опытов не превышала $S^2 \leq 0,110$. Так как расчетные значения критерия Кохрена $Gr=0,4243$ меньше табличного $G_{табл}=0,7679$ [1], при уровне значимости $\alpha=0,05$, то гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов принимается, и значит возможно проведение регрессионного анализа.

Рассчитав коэффициенты уравнения (1), получили уравнение регрессии для коэффициентов трения композиционных материалов на основе ТРГ с насыпной плотностью 14 ± 1 кг/м³ (4).

$$\hat{y} = 0,286 + 4,5 \times 10^{-3}X_1 - 0,029X_2 + 2,6 \times 10^{-3}X_1X_2 \quad (4)$$

Проверку статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии для коэффициентов трения проводили с помощью t-критерия Стьюдента. Все коэффициенты уравнения (4), кроме b_1 и b_{12} , статистически значимы при уровне значимости 0,05 и имеют доверительный интервал $\pm 6,3 \times 10^{-3}$.

После исключения статистически не значимых коэффициентов b_1 и b_{12} уравнение регрессии (4) принимает вид

$$\hat{y} = 0,286 - 0,029X_2. \quad (5)$$

Соответственно, рассчитав коэффициенты уравнения (1), получили уравнение регрессии для коэффициентов трения композиционных материалов на основе ТРГ с насыпной плотностью 200 ± 10 кг/м³ (6).

$$\hat{y} = 0,304 + 0,014X_1 - 0,03X_2 - 6,9 \times 10^{-4}X_1X_2 \quad (6)$$

Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии для коэффициентов трения композиционных материалов на основе ТРГ с насыпной плотностью $200 \pm 10 \text{ кг/м}^3$ показала, что все коэффициенты уравнения (6), кроме b_{12} , статистически значимы при уровне значимости 0,05 и имеют доверительный интервал $\pm 6,2 \times 10^{-3}$.

После исключения статистически не значимого коэффициента b_{12} уравнение регрессии (6) принимает вид

$$\hat{y} = 0,304 + 0,014X_1 - 0,03X_2 \quad (7)$$

Дополнительно провели эксперименты на основном уровне варьирования факторов, то есть при $n=30 \%$ и $P=3 \text{ МПа}$, который повторили 3 раза. Результаты экспериментов внесли в табл. 3 в строку 5*.

Полученные уравнения (5) и (7) проверяли на адекватность по критерию Фишера. Так как расчетные значения критериев Фишера $F_p=4,2$ и $F_p=2,1$ меньше табличного значения [1], то, соответственно, уравнения (5) и (7) адекватны [2].

Для приведения уравнений (4) и (5) к виду с натуральными значениями факторов использовали формулу кодирования (2), подставляя в уравнения (4) и (5) вместо кодовых натуральные значения факторов [2].

$$\hat{y} = 0,329 - 0,015x_2 \quad (8)$$

$$\hat{y} = 0,307 + 0,014x_1 - 0,015x_2 \quad (9)$$

На основании полученных результатов и анализа уравнений (5) и (7) можно сделать следующие выводы:

1. Содержание модифицированной силиконовой смолы в композиционных материалах на основе терморасширенного графита (ТРГ) с насыпной плотностью $14 \pm 1 \text{ кг/м}^3$ не влияет на коэффициенты трения по стали 08X18H10T.
2. С увеличением содержания модифицированной силиконовой смолы в композиционных материалах на основе терморасширенного графита (ТРГ) с насыпной плотностью $200 \pm 10 \text{ кг/м}^3$ коэффициенты трения по стали 08X18H10T возрастают.
3. С увеличением давления на образцы при испытании коэффициенты трения композиционных материалов на основе терморасширенного графита (ТРГ) с насыпной плотностью $14 \pm 1 \text{ кг/м}^3$ и $200 \pm 10 \text{ кг/м}^3$ уменьшаются.

Заключение

Исследованы триботехнические характеристики композиционного материала на основе терморасширенного графита. Получены аналитические зависимости влияния давления и содержания модифицированной силиконовой смолы на коэффициенты трения композиционных материалов на основе терморасширенного графита (ТРГ) с насыпной

плотностью 14 ± 1 кг/м³ и 200 ± 10 кг/м³, установленные в соответствии с методикой планирования экспериментов.

Используемые в статье оборудование для исследования изнашивания и методику эксперимента, возможно, применять не только для материала, описанного в статье, но и для других, например, фторопласта, полиэтилена, полиамида и композиций на их основе.

Список литературы

1. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 416 с.
2. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. Н. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. – М.: Наука, 1980. – 228 с.
3. Караваев Д.М., Макарова Л.Е., Дегтярев А.И., Трошков К.В. Определение насыпной плотности терморасширенного графита // Известия Самарского научного Центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 4(2). – С. 360-362.
4. Караваев Д.М., Матыгуллина Е.В., Макарова Л.Е., Нефедов Я.А., Черных А.А. Зависимость насыпной плотности порошка терморасширенного графита от скорости вращения гладких элементов измельчителя и продолжительности цикла измельчения // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6; URL: www.science-education.ru/120-16031 (дата обращения: 01.10.2015).
5. Караваев Д. М. Определение коэффициентов трения композиционного материала на основе терморасширенного графита в различных средах / Д. М. Караваев // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15, № 2. – С. 44-47.
6. Нефедов Я.А., Черных А.А., Караваев Д.М., Матыгуллина Е.В., Макарова Л.Е. Зависимость насыпной плотности порошка терморасширенного графита от скорости вращения элементов измельчителя с режущими кромками и продолжительности цикла измельчения // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 6; URL: www.science-education.ru (в печати).
7. Пат. 2460642 Российская Федерация, МПК В 29 С 43/02. Устройство для прессования порошков / А. М. Ханов, Д. М. Караваев, А. А. Нестеров, Л. Е. Макарова, Д. В. Смирнов, О. Ю. Исаев, В. А. Москалев, А. И. Дегтярев, Д. А. Петров; патентообладатель Гос. образоват. учр. высш. проф. образования «Перм. гос. техн. ун-т». № 2011125289/05; заявл. 17.06.2011; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 25. – 9 с. : ил.

8. Смирнов Д. В., Исаев О. Ю., Лепихин В. П. SEALUR-500 – новый уплотнительный материал для шаровой арматуры // Арматуростроение. – 2011. – № 1(70). – С. 56-57.
9. Трибологические свойства композиционных материалов на основе терморасширенного графита / Д. М. Караваев; науч. рук. А. М. Ханов // Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности. АК-Т0-2014 : междунар. науч.-практ. конф., 5–8 авг. 2014 г. : сб. докл. / Каб. министров Респ. Татарстан, М-во образования и науки Респ. Татарстан, М-во пром-сти и торговли Респ. Татарстан [и др.]. – Казань: Изд-во Казан, гос. техн. ун-та, 2014. I Т. 2. – С. 73-76.
10. The tribological properties of expanded graphite/silicone resin composites / D. Karavaev, L. Sirotenko, E. Matygullina // GeoConference on Nano, Bio and Green-Technologies for a Sustainable Future: 14th intern, multidisciplinary sci. geoconf. SGEM 2014, Albena, Bulgaria, 17–26 June, 2014: conf. proc. Vol. 1. Micro and Nano Technologies. Advances in Biotechnology /Intern. Multidisciplinary Sci. GeoConf. SGEM. I Sofia : STEF92 Technology Ltd., 2014. – P. 185-190.

Рецензенты:

Сиротенко Л.Д., д.т.н., проф. каф. МТиКМ ПНИПУ, г. Пермь;

Матыгуллина Е.В., д.т.н., проф. каф. МТиКМ ПНИПУ, г. Пермь.