

УДК 661.666.232

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА С КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИМ СВЯЗУЮЩИМ

© 2015 Д.М. Караваев, Е.В. Матыгуллина, Л.Д. Сиротенко, А.И. Дегтярев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 30.03.2015

Описано приспособление для испытания материалов на трение и износ по схеме «кольцо-диск». Исследовано влияние содержания в композиционном материале на основе терморасширенного графита кремнийорганического связующего, удельной нагрузки и скорости скольжения на коэффициент трения. Исследования проведены в соответствии с методикой планирования экспериментов. Получены регрессионные уравнения. Установлено, что с увеличением содержания кремнийорганического связующего в композиционном материале на основе терморасширенного графита коэффициент трения возрастает. С увеличением удельной нагрузки коэффициент трения уменьшается. Используемое 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.

Ключевые слова: *терморасширенный графит, кремнийорганическая смола, композиционный материал, трение, трибология, коэффициент трения*

В условиях интенсивной эксплуатации шаровых кранов, предполагающей стойкость к воздействию высоких температур (от +200 до +550°C), агрессивных сред, абразивного материала одним из факторов, ограничивающих их надежность, является недостаточная износостойкость уплотнения в области контакта пары «шар-седло» [1, 2]. Одним из основных показателей работы уплотнений шаровых кранов является усилие, затрачиваемое на поворот шара, которое пропорционально коэффициенту трения [3]. В этих условиях актуальной задачей современного арматуростроения следует считать разработку новых износостойких материалов с низким коэффициентом трения для уплотнительных элементов, повышающих эффективность эксплуатации оборудования в диапазоне температур от 200°C до 550°C [1].

Цель работы: экспериментальное установление зависимости коэффициента трения от содержания в композиционном материале (КМ) кремнийорганического связующего, удельной нагрузки и скорости скольжения.

Образцы КМ были произведены при тщательном смешивании порошков терморасширенного графита (ТРГ), полученного измельчением в две стадии [4], кремнийорганического связующего односторонним сжатием компонентов смеси, которые засыпали в удлиненную вертикальную форму

со съёмным дном [5]. КМ на основе ТРГ были спрессованы при давлении 60 МПа в течение 60 сек. и затем термообработаны в течение 30 мин. при температуре $200 \pm 10^\circ\text{C}$. Коэффициент трения и износ колец по сухой поверхности контртела в виде диска из стали 20Х13 с твердостью 50 HRC и шероховатостью $Ra=0,84$ мкм определяли на испытательной машине МИ-40КУ со специально разработанным приспособлением по схеме «кольцо-диск» (рис. 1) [1, 3] при комнатной температуре и относительной влажности 25%.

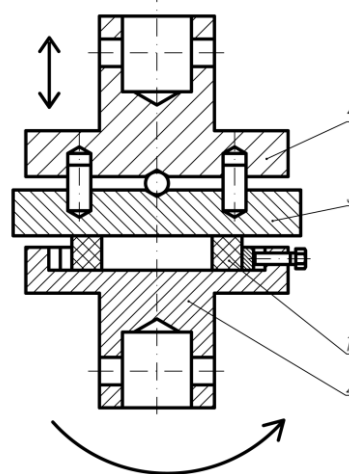


Рис. 1. Приспособление для исследования изнашивания: 1 – кольцевой образец; 2 – захват; 3 – контртело; 4 – самоустанавливающийся захват

Кольцевой образец 1 размером $\varnothing 50 \times 70 \times 10$ мм закрепляли в захвате 2, который через переходник крепился к выходному валу кручения испытательной машины МИ-40КУ (на рис. 1 не показаны).

Караваев Дмитрий Михайлович, ассистент. E-mail: kmctm@ya.ru

Матыгуллина Елена Вячеславовна, доктор технических наук, профессор. E-mail: matik68@rambler.ru

Сиротенко Людмила Дмитриевна, доктор технических наук, профессор. E-mail: sirotenko@pstu.ru

Дегтярев Александр Иванович, кандидат технических наук, профессор. E-mail: mtf-dekanat@pstu.ru

Контртело в виде диска 3 устанавливали в самоустанавливающемся захвате 4, который через переходник крепился к комбинированному датчику силы и момента (на рис. 1 не показаны). Момент трения записывали через систему сбора данных на компьютер, а затем рассчитывали коэффициент трения. Перед началом каждого испытания поверхность контртела очищали с помощью ацетона [1].

Исследования проводили в соответствии с методикой планирования экспериментов. Каждую из серий испытаний выполняли в рамках полного факторного эксперимента. Факторы – содержание в КМ кремнийорганического связующего (n), удельную нагрузку (P) и скорость скольжения (V) задавали на двух уровнях (минимальном и максимальном). Каждый эксперимент при выбранной комбинации факторов повторяли по 5 раза. Чтобы исключить влияние случайных ошибок, вызванных внешними условиями (переменой 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 и износа от давления P и содержания модифицированной силиконовой смолы в композиционном материале использовали математическую модель первого порядка в виде полинома [6]

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

В этом случае 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 механических [7, 8] и триботехнических [2, 9] характеристик использовался Симплекс-вершинный план эксперимента с дополнительными внутренними точками. По этому плану содержания модифицированной силиконовой смолы в КМ 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 варьирования факторов представлены в табл. 1. Матрица планирования эксперимента с расчетными столбцами взаимодействия факторов экспериментального плана 2^2 представлена в табл. 2. Результаты экспериментов, а также результаты их статистической обработки, представлены в табл. 3.

Таблица 1. Уровни варьирования факторов

№ п/п	Уровень варьирования факторов	Обозначение кодовое	n , %	P , МПа	V , об/мин
			X_1	X_2	X_3
1	основной	0	30	3	3
2	интервал варьирования	Δx	10	2	2
3	нижний	-1	20	1	1
4	верхний	+1	40	5	5

Статистическая обработка данных по коэффициенту трения показала, что дисперсия параллельных опытов не превышала $S^2 \leq 1,8E-4$. Для определения возможности регрессионного анализа рассчитали однородность дисперсий параллельных опытов по критерию Кохрена [6]. Так как расчет-

ные значение критерия Кохрена $Gr=0,139$ меньше табличного $G_{\text{табл}}=0,391$ [10] при уровне значимости $\alpha=0.05$, то гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов принимается, и, значит, можно провести регрессионный анализ.

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Таблица 3. Результаты экспериментов

№	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}	y_{u4}	y_{u5}	$\bar{y}_u$	S^2	S_n	$w_n, \%$	S_{ny}	Δy $\alpha=0,95$	$\hat{y}_u$
1	0,185	0,173	0,192	0,202	0,177	0,186	1,4E-04	0,012	6,3	0,005	0,015	0,186
2	0,279	0,258	0,283	0,284	0,276	0,276	1,1E-04	0,011	3,8	0,005	0,013	0,282
3	0,151	0,130	0,132	0,130	0,130	0,135	8,5E-05	0,009	6,8	0,004	0,012	0,141
4	0,215	0,223	0,214	0,215	0,227	0,219	3,4E-05	0,006	2,7	0,003	0,007	0,219
5	0,214	0,230	0,241	0,239	0,249	0,235	1,8E-04	0,013	5,7	0,006	0,017	0,230
6	0,260	0,267	0,276	0,274	0,274	0,270	4,4E-05	0,007	2,5	0,003	0,008	0,271
7	0,128	0,131	0,122	0,144	0,147	0,134	1,1E-04	0,011	8,0	0,005	0,013	0,135
8	0,196	0,201	0,182	0,209	0,200	0,198	9,8E-05	0,010	5,0	0,004	0,012	0,193

Примечание: $\bar{y}_u$ - среднее значение коэффициента трения, S^2 - дисперсия параллельных опытов, S_n - средняя квадратичная ошибка одиночного результата при n измерениях, w_n - коэффициент вариации, S_{ny} - средняя квадратичная ошибка среднего арифметического, Δy - доверительный интервал среднего арифметического $\hat{y}_u$ - расчетное значение коэффициенты трения, найденное по уравнению регрессии

Рассчитав коэффициенты уравнения (1), получили уравнение регрессии для коэффициентов трения (4)

$$\hat{y} = 0,207 + 0,034X_1 - 0,035X_2 + 0,003X_3 + 0,003X_1X_2 - 0,009X_1X_3 - 0,008X_2X_3 + 0,004X_1X_2X_3 \quad (4)$$

Проверку статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии для коэффициентов трения проводили с помощью t-критерия Стьюдента. Все коэффициенты уравнения (4), кроме b_3 и b_{12} статистически значимы при уровне

значимости 0,05 и имеют доверительный интервал $\pm 0,003$. После исключения статистически не значимых коэффициентов b_{12} уравнение регрессии (4) принимает вид

$$\hat{y} = 0,207 + 0,034X_1 - 0,035X_2 - 0,009X_1X_3 - 0,008X_2X_3 + 0,004X_1X_2X_3 \quad (5)$$

Полученное уравнение (5) проверяли на адекватность по критерию Фишера. Так как расчетное значение критерия Фишера $F_p=2,97$ меньше табличного $F_{табл}=3,29$ [10], то, соответственно, уравнение (5) адекватно [6]. Для приведения уравнения

(5) к виду с натуральными значениями факторов использовали формулу кодирования (2), подставляя в уравнение (5) вместо кодовых натуральные значения факторов [6].

$$\hat{y} = 0,069 + 6 \times 10^{-3}x_1 - 2,09x_2 + 0,03x_3 + 3 \times 10^{-4}x_1x_2 - 8 \times 10^{-4}x_1x_3 - 5 \times 10^{-3}x_2x_3 + 1 \times 10^{-4}x_1x_2x_3 \quad (6)$$

Выводы:

1. С увеличением содержания модифицированной силиконовой смолы в КМ на основе терморасширенного графита коэффициент трения возрастает.

2. С увеличением удельной нагрузки на образец и скорости скольжения при испытании коэффициент трения уменьшается.

Получена аналитическая зависимость влияния содержания в КМ на основе терморасширенного графита кремнийорганического связующего, удельной нагрузки и скорости скольжения на коэффициент трения, установленная по результатам планирования эксперимента. Используемое

оборудование для исследования изнашивания и методику эксперимента можно применять и для других материалов, например, фторопласта, полиэтилена, полиамида и композиций на их основе.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по государственному заданию (проектная часть) № 9.1570.2014/К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Караваев, Д.М. Влияние структурно-морфологических особенностей терморасширенного графита на износостойкость композиционного материала с кремнийорганическим связующим / Д.М. Караваев, А.М. Ханов, Е.В. Матыгуллина, Л.Д. Сиротенко // Известия Самарского научного центра

- Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 4(6). С. 378-381.
2. *Караваев, Д.М.* Трибологические свойства композиционных материалов на основе терморасширенного графита // 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. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. I Т. 2. С. 73-76.
 3. *Черных, А.А.* Исследование влияния давления и содержания модифицированной силиконовой смолы на триботехнические характеристики композиционного материала на основе терморасширенного графита / *А.А. Черных, Я.А. Нефедов, Д.М. Караваев* // Современные проблемы науки и образования [Электронный ресурс]. 2014. № 6. 8 с. Режим доступа: URL: www.science-education.ru/120-16098 (дата обращения: 03.03.2015).
 4. *Караваев, Д.М.* Определение насыпной плотности терморасширенного графита / *Д.М. Караваев, Л.Е. Макарова, А.И. Дегтярев, К.В. Трошков* // Известия Самарского научного Центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 4(2). С. 360-362.
 5. Пат. 2469859 Российская Федерация, МПК В30В 15/02 (2006.01), В22F 3/03 (2006.01), В29С 43/02 (2006.01). Устройство для прессования полых изделий / *А.М. Ханов, Д.М. Караваев, А.А. Нестеров* и др.; № 2011125358/02; заявл. 20.06.11 ; опубл. 20.12.12, Бюл. № 35. 11 с.
 6. *Евдокимов, Ю.А.* Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / *Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесников, А.Н. Тетерин*. – М.: Наука, 1980. 228 с.
 7. *Караваев, Д.М.* Анизотропия механических свойств композиционного материала на основе терморасширенного графита / *Д.М. Караваев, А.М. Ханов, А.И. Дегтярев* и др. // Известия Самарского научного Центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 4(5). С. 1243-1245.
 8. *Караваев, Д.М.* Механические свойства композиционного материала на основе терморасширенного графита / *Д.М. Караваев, А.М. Ханов, А.И. Дегтярев* и др. // Известия Самарского научного Центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 1(2). С. 562-564.
 9. *Karavaev, D.* 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.
 10. *Большев, Л.Н.* Таблицы математической статистики / *Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов*. – М.: Наука. Главная редакция физико-математическом литературы, 1983. 416 с.

DETERMINATION THE FRICTION COEFFICIENT OF COMPOSITE MATERIAL ON THE BASIS OF THERMOEXPANDED GRAPHITE WITH SILICON-ORGANIC BINDER

© 2015 D.M. Karavayev, E.V. Matygullina, L.D. Sirotenko, A.I. Degtyarev

Perm National Research Polytechnical University

The device for testing materials for friction and wear according to the scheme "ring-disk" is described. Influence of the content in composite material on the basis of thermoexpanded graphite the silicon-organic binder, specific load and speed of sliding of friction coefficient is investigated. Researches are conducted according to the method of design of experiments. The regression equations are received. It is established that with increase in the maintenance the silicon-organic binder on the basis of thermoexpanded graphite the friction coefficient increases in composite material. With increasing in specific loading the friction coefficient decreases. The used equipment for research the wear and design of experiment is possible to apply not only to the material, described in article. but also to others, for example, fluoroplastic, polyethylene, polyamide and compositions on their basis.

Key words: *thermoexpanded graphite, silicon-organic resin, composite material, friction, tribology, friction coefficient*

Dmitriy Karavaev, Assistant. E-mail: kmcm@ya.ru
Elena Matygullina, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: matik68@rambler.ru
Lyudmila Sirotenko, Doctor of technical Sciences, Professor. E-mail: sirotenko@pstu.ru
Alexander Degtyarev, Candidate of Technical Sciences, Professor. E-mail: mtf-dekanat@pstu.ru