

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ И СОДЕРЖАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СИЛИКОНОВОЙ СМОЛЫ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

Черных А.А.<sup>1</sup>, Нефедов Я.А.<sup>1</sup>, Караваев Д.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, [kmcm@ya.ru](mailto:kmcm@ya.ru)

---

Описано приспособление для испытания материалов на трение и износ по схеме «кольцо-диск». Исследовано влияние содержания модифицированной силиконовой смолы и давления на триботехнические характеристики композиционного материала на основе терморасширенного графита при скорости вращения образца 1 об/мин. Исследования проведены в соответствии с методикой планирования экспериментов. Получены регрессионные уравнения. Установлено, что с увеличением содержания модифицированной силиконовой смолы в композиционном материале на основе терморасширенного графита коэффициент трения и износ возрастают. С увеличением давления коэффициент трения уменьшается, а износ увеличивается. 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.

---

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

## STUDY OF CONTENT OF THE MODIFIED SILICONE RESIN AND PRESSURE ON THE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIAL BASED ON EXPANDED GRAPHITE

Chernykh A.A.<sup>1</sup>, Nefedov I.A.<sup>1</sup>, Karavaev D.M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Perm national research polytechnic university, Russia, Perm, 614990, Komsomolsky Av. 29, [kmcm@ya.ru](mailto:kmcm@ya.ru)

---

Describes a device for testing materials for friction and wear on a "ring - disk". The influence of the content of the modified silicone resin, and the pressure on the tribological characteristics of the composite material based on expanded graphite at a rotational speed of the sample 1 rot/min. The studies were conducted in accordance with the methodology of design of experiments. Obtained regression equations. Found that, with increasing content of the modified silicone resin in the composite material based on expanded graphite friction and wear increases. As pressure increases, the friction coefficient is reduced and wear is increased. Used in the paper testing equipment wear and experimental technique, may be applied not only to the material described in the article, but for others, such as fluoroplastic, polyethylene, polyamide and compositions based on them.

---

Keywords: expanded graphite, modified silicone resin, composite material, friction, wear, friction coefficient

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 износостойкость уплотнения в области контакта пары «шар-седло» [3, 9]. Одним из важнейших показателей работы уплотнений шаровых кранов является усилие, затрачиваемое на поворот шара, которое пропорционально коэффициенту трения. 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 [3].

Одним из основных факторов, влияющих на трение и износ, является давление  $P$  [6].

Целью данной работы является экспериментальное установление зависимости коэффициента трения и износа от давления и содержания модифицированной силиконовой смолы в композиционном материале на основе терморасширенного графита.

### **Материалы и методы исследования**

Образцы композиционного материала были произведены при тщательном смешивании порошков терморасширенного графита (ТРГ), полученного измельчением в две стадии [7] и модифицированной силиконовой смолы односторонним сжатием компонентов смеси, которые засыпали в удлиненную вертикальную форму, со съёмным дном [8]. Композиционные материалы на основе ТРГ были спрессованы при давлении в диапазоне 30-90 МПа в течение 60 сек и затем термообработаны в течение 30 мин при температуре  $200 \pm 10$  °С.

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) [3] при скорости скольжения 0,003м/сек (скорости вращения образца 1 об/мин), комнатной температуре, относительной влажности 25% - 35%.

Кольцевой образец - 1 размером  $\phi 50 \times \phi 70 \times 10$  мм закрепляли в захвате 2, который через переходник крепился к выходному валу кручения испытательной машины МИ-40КУ (на рис. 1 не показаны). 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 коэффициента трения. Износ образцов рассчитывали с использованием метода потери массы. Масса каждого образца была измерена с помощью электронных весов с разрешением  $\pm 0,1$  мг. Стальной диск практически не изнашивался. Испытание проводили в течение 30 мин., перед началом каждого испытания поверхность контртела очищали с помощью ацетона [3].

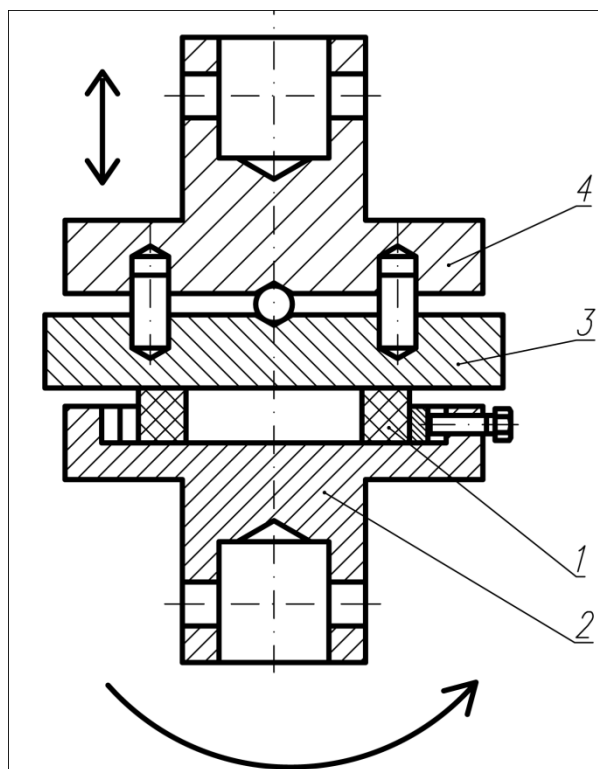


Рис. 1. Приспособление для исследования изнашивания: 1 - кольцевой образец; 2 – захват; 3 – контртело; 4 - самоустанавливающийся захват

Исследования проводили в соответствии с методикой планирования экспериментов. Каждую из серий испытаний выполняли в рамках полного факторного эксперимента. Факторы – давление  $P$  и содержания модифицированной силиконовой смолы задавали на двух уровнях (минимальном и максимальном). Каждый эксперимент при выбранной комбинации факторов повторяли по 5 раз. 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 [4]

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

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;  $\Delta x_i$  – интервал варьирования  $i$ -го фактора:

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

При проведении исследований по определению механических [1, 5] и триботехнических [9, 10] характеристик использовался Симплекс-вершинный план эксперимента с дополнительными внутренними точками. По этому плану содержания модифицированной силиконовой смолы в композиционном материале 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

| №<br>п/п | Уровень<br>варьируемых<br>факторов | Обозначение<br>кодированное | P, МПа         |                |
|----------|------------------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|
|          |                                    |                             | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> |
| 1        | Основной                           | 0                           | 30             | 3              |
| 2        | Интервал<br>варьирования           | Δx                          | 10             | 2              |
| 3        | Нижний                             | -1                          | 20             | 1              |
| 4        | Верхний                            | +1                          | 40             | 5              |

Матрица планирования для экспериментального плана 2<sup>2</sup> представлена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

| №<br>опыта | X <sub>0</sub> | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> | Y <sub>u1</sub> | Y <sub>u2</sub> | Y <sub>u3</sub> | Y <sub>u4</sub> | Y <sub>u5</sub> | $\bar{Y}_u$ |
|------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 1          | +1             | -1             | -1             | +1                            | Y <sub>11</sub> | Y <sub>21</sub> | Y <sub>31</sub> | Y <sub>41</sub> | Y <sub>51</sub> | $\bar{Y}_1$ |
| 2          | +1             | +1             | -1             | -1                            | Y <sub>12</sub> | Y <sub>22</sub> | Y <sub>32</sub> | Y <sub>42</sub> | Y <sub>52</sub> | $\bar{Y}_2$ |
| 3          | +1             | -1             | +1             | -1                            | Y <sub>13</sub> | Y <sub>23</sub> | Y <sub>33</sub> | Y <sub>43</sub> | Y <sub>53</sub> | $\bar{Y}_3$ |
| 4          | +1             | +1             | +1             | +1                            | Y <sub>14</sub> | Y <sub>24</sub> | Y <sub>34</sub> | Y <sub>44</sub> | Y <sub>54</sub> | $\bar{Y}_4$ |

### Результаты исследования и их обсуждение

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

## Результаты экспериментов

| №                      | $Y_{u1}$ | $Y_{u2}$ | $Y_{u3}$ | $Y_{u4}$ | $Y_{u5}$ | $\bar{Y}_u$ | $S^2$                 | $S_n$  | $W_n, \%$ | $S_{ny}$ | $\Delta y_{\alpha=0,95}$ | $\hat{y}_u$ |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|-----------------------|--------|-----------|----------|--------------------------|-------------|
| Коэффициент трения $f$ |          |          |          |          |          |             |                       |        |           |          |                          |             |
| 1                      | 0,249    | 0,226    | 0,244    | 0,262    | 0,246    | 0,245       | $1,67 \times 10^{-4}$ | 0,0129 | 5,3       | 0,0075   | 0,0209                   | 0,247       |
| 2                      | 0,302    | 0,293    | 0,320    | 0,326    | 0,302    | 0,309       | $1,91 \times 10^{-4}$ | 0,0138 | 4,5       | 0,0080   | 0,0223                   | 0,307       |
| 3                      | 0,185    | 0,187    | 0,183    | 0,179    | 0,160    | 0,179       | $1,19 \times 10^{-4}$ | 0,0109 | 6,1       | 0,0063   | 0,0176                   | 0,177       |
| 4                      | 0,239    | 0,237    | 0,227    | 0,234    | 0,234    | 0,234       | $2,07 \times 10^{-5}$ | 0,0045 | 1,9       | 0,0026   | 0,0074                   | 0,237       |
| Износ $I$ , мг         |          |          |          |          |          |             |                       |        |           |          |                          |             |
| 1                      | 0,3      | 0,3      | 0,2      | 0,4      | 0,2      | 0,28        | 0,007                 | 0,084  | 29,9      | 0,048    | 0,135                    | 0,24        |
| 2                      | 0,8      | 0,4      | 0,6      | 0,4      | 0,5      | 0,54        | 0,028                 | 0,167  | 31,0      | 0,097    | 0,271                    | 0,59        |
| 3                      | 0,8      | 0,7      | 1,3      | 1,0      | 1,0      | 0,96        | 0,053                 | 0,230  | 24,0      | 0,133    | 0,372                    | 1,01        |
| 4                      | 1,3      | 1,7      | 0,9      | 1,7      | 1,4      | 1,40        | 0,110                 | 0,332  | 23,7      | 0,191    | 0,536                    | 1,36        |

Статистическая обработка данных о коэффициенте трения показала, что дисперсия параллельных опытов не превышала  $S^2 \leq 1,91 \times 10^{-4}$ . Для определения возможности регрессионного анализа рассчитали однородность дисперсий параллельных опытов по критерию Кохрена [4]. Так как расчетные значение критерия Кохрена  $Gr=0,384$  меньше табличного  $G_{табл}=0,6287$  [2], при уровне значимости  $\alpha=0.05$ , то гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов принимается, и значит возможно проведение регрессионного анализа.

Соответственно, обработка данных по износу, показала, что дисперсия параллельных опытов не превышала  $S^2 \leq 0,110$ . Так как расчетные значение критерия Кохрена  $Gr=0,141$  меньше табличного  $G_{табл}=0,6287$  [2], 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 (4)

$$\hat{y} = 0,242 + 0,03X_1 - 0,035X_2 + 0,002X_1X_2 \quad (4)$$

Проверку статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии для коэффициентов трения проводили с помощью t-критерия Стьюдента. Все коэффициенты уравнения (4), кроме  $b_{12}$  статистически значимы при уровне значимости 0,05 и имеют доверительный интервал  $\pm 0.005$ .

После исключения статически не значимого коэффициента  $b_{12}$  уравнение регрессии (4) принимает вид

$$\hat{y} = 0,242 + 0,03X_1 - 0,035X_2. \quad (5)$$

Соответственно, рассчитав коэффициенты уравнения (1) получили уравнение регрессии для износа (6)

$$\hat{y} = 0,795 + 0,175X_1 + 0,385X_2 + 0,045X_1X_2 \quad (6)$$

Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии для износа показала, что все коэффициенты уравнения (6), кроме  $b_{12}$  статистически значимы при уровне значимости 0,05 и имеют доверительный интервал  $\pm 0.105$ .

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

$$\hat{y} = 0,795 + 0,175X_1 + 0,385X_2 \quad (7)$$

Полученные уравнения (5) и (7) проверяли на адекватность по критерию Фишера. Так как расчетные значения критериев Фишера  $F_p=0,651$  и  $F_p=0,818$  меньше 1, то, соответственно, уравнения (5) и (7) адекватны [4].

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 [3].

$$\hat{y} = 0,205 + 5 \times 10^{-3}x_1 - 0,018x_2 \quad (8)$$

$$\hat{y} = -0,307 + 0,018x_1 + 0,193x_2 \quad (9)$$

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

1. С увеличением содержания модифицированной силиконовой смолы в композиционном материале на основе терморасширенного графита коэффициент трения и износ возрастают.

2. С увеличением давления на образец при испытании коэффициент трения уменьшается, а износ увеличивается.

### **Заключение**

Исследованы триботехнические характеристики композиционного материала на основе терморасширенного графита. Приведены аналитические зависимости влияния давления и содержания модифицированной силиконовой смолы на коэффициент трения и износ, установленные по результатам 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.

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

### **Список литературы**

1. Анизотропия механических свойств композиционного материала на основе терморасширенного графита / Д.М. Караваев, А.М. Ханов, А.И. Дегтярев, Л.Е. Макарова, Д.В. Смирнов, О.Ю. Исаев // Известия Самарского научного Центра Российской академии наук. - 2012. - Т. 14, № 4(5). - С. 1243-1245.
2. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. М.: Наука. Главная редакция физико-математическом литературы, 1983. 416 с.
3. 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.
4. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. Н. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980. 228 с.
5. Механические свойства композиционного материала на основе терморасширенного графита / Д.М. Караваев, А.М. Ханов, А.И. Дегтярев, Л.Е. Макарова, Д.В. Смирнов, О.Ю. Исаев // Известия Самарского научного Центра Российской академии наук. - 2012. - Т. 14, № 1(2). - С. 562-564.
6. Никулин А. В., Савелов А. С., Сачек Б. Я. Сравнительное исследование триботехнических свойств фенольных и эпоксидных углепластиков // Трение и износ. - 2010. - Т. 31, N 3. - С. 270-275.
7. 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.
8. 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, 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» № 2011125358/02 ; заявл. 20.06.11 ; опубл. 20.12.12, Бюл. № 35. - 11с.
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.]. I 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 ЛД., д.т.н., проф. каф. МТиКМ ПНИПУ, г. Пермь;

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